

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Estudo Hidrogeológico no Sistema Aquífero
Aluviões do Tejo: contributo para a
sustentabilidade da massa de água subterrânea**

Bruna Aparecida Gomes Almeida

Mestrado em Geologia Aplicada

Especialização em Hidrogeologia

Trabalho de Projeto orientado por:

Maria Catarina Rosalino da Silva

Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho

“Teachers open the door... You enter by yourself.”

Chinese Proverb

RESUMO

O sistema aquífero das Aluviões do Tejo desenvolve-se nos depósitos aluvionares do Holocénico e em terraços fluviais do Plistocénico. Está localizado na zona central da Bacia do Baixo Tejo, inserida na Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5A).

A sua localização geográfica estratégica e a alta produtividade, culminaram na sua extensiva exploração para abastecimento público de água, para uso agrícola e industrial. A exploração do sistema aquífero vem causando perturbações no potencial hidráulico, originando, por vezes, inversão do sentido do fluxo subterrâneo e intrusão de água salina. Por sua vez a expansão urbana e as modificações na cobertura e no uso do solo, têm contribuído para a ocorrência de contaminações, sendo conhecidas elevadas concentrações de nitrato, ferro e manganês.

De suporte hidrogeológico maioritariamente poroso, o sistema aquífero apresenta particular vulnerabilidade à poluição. A conexão hidráulica ao rio Tejo facilita a propagação das contaminações, funcionando este rio como origem ou destino de poluentes. Por esta razão, o sistema aquífero das Aluviões do Tejo é alvo das medidas de controlo e monitorização da qualidade das suas águas pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), e é objeto principal de estudo desta dissertação.

Na construção do modelo que caracteriza geometricamente o sistema e o seu funcionamento hidráulico, destacam-se duas fases mais importantes, a do levantamento e do processamento dos dados (60 *logs* de sondagens, 60 ensaios de bombagem e 75 resultados de análises físico-químicas) e a fase da aplicação de métodos geoestatísticos e de interpolação espacial. Na caracterização do estado físico-químico da massa de água, foram aplicadas técnicas de análise multivariada.

O modelo mostra uma correlação negativa entre a profundidade do sistema aquífero e a sua produtividade, apesar da presença de níveis intercalados de baixa permeabilidade. Esta relação é especialmente bem definida entre os setores montante e jusante. A montante, a espessura produtiva do aquífero varia entre os 19 e os 29 m não ultrapassando os 40 m de profundidade. Naquele setor encontram-se valores de caudal específico superiores a 1500 m²/dia e condutividade hidráulica que ultrapassa os 60 m/dia. No setor jusante, a profundidade da base do aquífero ultrapassa os 70 m, apresentando caudal específico inferior a 900 m²/dia e condutividade hidráulica média de 30 m/dia.

Palavras-chave: Aluviões do Tejo, hidrogeologia, geoestatística, contaminação, sustentabilidade

ABSTRACT

The Aluviões do Tejo aquifer system develops in the alluvium deposits of the Holocene period and fluvial terraces of the Pleistocene. It is located in the central area of the Tejo Basin in the main discharge zone.

Its strategic geographical location and high productivity facilitate its exploitation for public water supply, agriculture, and industry. But its overexploitation is causing disturbances in its hydraulic potential, changing the flow direction, and promoting the marine water intrusion. Also, the urban sprawl and the changings in land use, are contributing to the occurrence of contamination, being known high concentrations of nitrate, iron, and manganese.

The aquifer system is particularly vulnerable to pollutions. Its porous hydrological formations and the hydraulic connection to the Tejo river facilitates the spread of contaminations, being the river a source or destination of pollutants. Nowadays, the aquifer system integrates the water quality monitoring proceedings carried out by the Portuguese Environment Agency (APA).

Building the model which geometrically characterizes the system and its hydraulic behaviour, had two important steps, the data mining and data processing (60 drilling logs, 60 pumping tests and 75 results of physical-chemical analyses) and then building the model applying geostatistical and spatial interpolation methods. The evaluation of the chemical status of the water body includes principal component analysis (PCA) and data posting, identifying points of contamination by nitrate, iron and manganese.

The proposed model shows a negative correlation between the depth of the aquifer system and its productivity, despite the presence of intercalated levels of low permeability. This relationship is spatially well defined in the upstream and downstream sectors. In the upstream sector, the aquifer depth does not exceed 40 m, transmissivity values are greater than 1500 m²/day and hydraulic conductivity that exceeds 60 m/day. The maximum estimated depth is 80 m in the downstream sector. In this sector, the transmissivity values are below 900 m²/day and the average hydraulic conductivity of 30 m/day.

Key words: Tagus River, Hidrogeology, geoestatistic methods, contamination, sustainability

ÍNDICE DE CONTEÚDO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE CONTEÚDO	v
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ABREVIATURAS	x
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	2
2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	2
2.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	3
2.3. HIDROGRAFIA	6
2.4. HIDROGEOLOGIA	8
2.5. QUALIDADE DA ÁGUA	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. DADOS DISPONÍVEIS	12
3.2. METODOLOGIA	14
3.2.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	15
3.2.2. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E GEOESTATÍSTICA	16
4. MODELO GEOMÉTRICO	18
4.1. ESTUDO DE LOGS DE SONDAGENS	18
4.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO AQUÍFERO	18
4.3. PERFIS LITOLÓGICOS NO SISTEMA AQUÍFERO DAS ALUVIÕES DO TEJO	21
4.4. ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO AQUÍFERO	25
4.5. DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA PRODUTIVA	26
4.6. REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO SISTEMA AQUÍFERO	29
5. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO SISTEMA AQUÍFERO	31
5.1. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE BOMBEAMENTO	31
5.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA PRODUTIVIDADE	32
5.3. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS	35
5.4. PIEZOMETRIA	39
6. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA	45
6.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E GRANDEZAS FÍSICAS	47

6.2.	FÁCIES QUÍMICAS DA ÁGUA	52
6.3.	CONTAMINAÇÃO	56
6.3.1.	FERRO E MANGÂNES	56
6.3.2.	NITRATO	58
7.	CONCLUSÃO	60
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	ANEXOS.....	66
	LOGS DE SONDAGENS	66
A.1.	REGIÃO DE LOURES (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 34-B)	66
A.2.	REGIÃO DE SANTO ESTEVÃO (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 35-A).....	67
A.3.	REGIÃO DE CORUCHE (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-C)	68
A.4.	REGIÃO DE CORUCHE (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-C)	69
A.5.	REGIÃO DE TORRES NOVAS (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 27-C)	70
A.6.	REGIÃO DE SANTARÉM (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-A).....	71
A.7.	REGIÃO DE SANTARÉM (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-A).....	72
A.8.	REGIÃO DE ABRANTES (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 27-D)	73
A.9.	REGIÃO DE ABRANTES (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 27-D)	74
	MATRIZ DE CORRELAÇÃO	75

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - DESCRIÇÃO DOS LOGS DE SONDAGENS UTILIZADOS NA DEFINIÇÃO DOS PERFIS GEOLÓGICOS, COM INDICAÇÃO DE: PROFUNDIDADE ESTIMADA DA BASE DO AQUIFERO (PROF. BASE); COTA TOPOGRÁFICA (COTA); DIVISÃO CARTOGRÁFICA DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL (FOLHA); GEOLOGIA DE SUPERFÍCIE (GEOLOGIA); INFORMAÇÃO RELATIVA A CAPTAÇÃO (CAPTAÇÃO); POSIÇÃO GEOGRÁFICA NA ÁREA DE ESTUDO (SETOR). A - ALUVIÕES; A1 - TERRAÇOS ARENOSOS ATUAIS; Q - TERRAÇOS, AREIAS E CASCALHEIRAS; T - TERCIÁRIO; JE - JUSANTE-ESQUERDA, CD - CENTRO-DIREITA; MD - MONTANTE-DIREITA; ME - MONTANTE-ESQUERDA.	21
TABELA 2 - ALGUMAS DEFINIÇÕES NO AJUSTAMENTO DO MODELO TEÓRICO NA ESTIMAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA BASE DO SISTEMA AQUIFERO POR <i>KRIGING</i> E RESPECTIVOS ERROS ESTATÍSTICOS. LEGENDA DA TABELA: MAX Nº V (NÚMERO MÁXIMO DE VIZINHOS); MIN Nº V (NÚMERO MÍNIMO DE VIZINHOS); RMSE (RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO).	25
TABELA 3 - LIMITES DE PERMEABILIDADE DE ALGUMAS ROCHAS SEDIMENTARES. TABELA ADAPTADA DE CUSTODIO & LLAMAS (1996).	37
TABELA 4 - POROSIDADES MÉDIAS DE ALGUMAS ROCHAS/MATERIAIS SEDIMENTARES (CHAPPELIER, 1992).	37
TABELA 5 - BREVE DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA CONSIDERADOS NO ESTUDO DA PIEZOMETRIA.	42
TABELA 6 - VALORES DOS LIMIARES ESTABELECIDOS PARA ALGUNS PARÂMETROS.	45
TABELA 7 - ESTATÍSTICA DOS DADOS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO SISTEMA AQUIFERO ALUVIÕES DO TEJO, ADAPTADO DE ALMEIDA <i>ET AL.</i> , 2000.	2
FIGURA 2.2 - CARTA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO (COS2018) DA LEZÍRIA DO TEJO.	3
FIGURA 2.3 - ÁREA DE ESTUDO DELIMITADA SOBRE EXCERTO DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:500000, WMS - WEB MAP SERVICES (LNEG, 1992).	4
FIGURA 2.4 - A) REPRESENTAÇÃO TEÓRICA DO MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS TERRAÇOS FLUVIAIS; B) CONFIGURAÇÃO DO PERFIL TEÓRICO DAS VERTENTES DO VALE DO TEJO (MENDONÇA, 1990). A3 - SEIXOS E CALHAUS DO FIM DO CICLO; A2 - COMPLEXO INTERGLACIÁRIO DE ENCHIMENTO; B1 - SEIXOS E CALHAUS DO INÍCIO DO CICLO, DERIVADOS DE A3; B2 - COMPLEXO INTERGLACIÁRIO DE ENCHIMENTO; B3 - SEIXOS E CALHAUS DO FIM DO CICLO, DERIVADOS DE A3; C5 - DEPÓSITOS RESULTANTES DA EROÇÃO DAS VERTENTES E DEPÓSITOS EÓLICOS CONTEMPORÂNEOS DE "B" OU POSTERIORES. 1 - ARGILAS; 2 - AREIAS; 3 - SEIXOS E CALHAUS.	5
FIGURA 2.5 - MAPA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA RH5A - TEJO E RIBEIRAS DO OESTE (EEA, 2019).	7
FIGURA 2.6 - ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO DO SISTEMA AQUIFERO DAS ALUVIÕES DO TEJO DENTRO DAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE PORTUGAL, À ESQUERDA ADAPTADO DE ALMEIDA <i>ET AL.</i> , (2000). MODELO DIGITAL DE TERRENO E AS REDES DE DRENAGEM NA BACIA DO TEJO, À DIREITA.	8
FIGURA 2.7 - MODELO CONCEPTUAL DOS AQUIFEROS DA BACIA DO TEJO-SADO, MENDONÇA (2010).	9
FIGURA 2.8 - FÁCIES DA ÁGUA DOS FUROS DE CAPTAÇÃO DE VALADA I (MENDONÇA, 2018).	11
FIGURA 3.1 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA COM INFORMAÇÃO HIDROGEOLÓGICA UTILIZADA NESTE TRABALHO. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS (BASES DE DADOS DE RECURSOS	

HIDROGEOLÓGICOS PORTUGUESES SOB A DIREÇÃO DO LNEG E DOS DADOS INVENTARIADOS NA BASE DE DADOS ONLINE DO SNIRH).....	13
FIGURA 3.2 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ALGORITMO DE DESENVOLVIMENTO DO PRESENTE TRABALHO.	14
FIGURA 4.1 - HISTOGRAMA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO SISTEMA AQUÍFERO, COM BASE NA ANÁLISE DE 60 DE LOGS DE SONDAGEM EXECUTADAS NA ÁREA DO SISTEMA AQUÍFERO ALUVIÕES DO TEJO.	19
FIGURA 4.2 - ANÁLISE DE PADRÕES E AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS COM VALORES DA PROFUNDIDADE DA BASE DO AQUÍFERO.	20
FIGURA 4.3 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DOS LOGS DE SONDAGENS E O SEU ENQUADRAMENTO NA REDE DE DRENAGEM PRINCIPAL DA BACIA DO BAIXO TEJO.	20
FIGURA 4.4 - REPRESENTAÇÃO DOS PERFIS GEOLÓGICOS SOBRE INFORMAÇÃO DA CARTA GEOLÓGICA ADAPTADA DE ALMEIDA <i>ET AL.</i> , (2000).....	22
FIGURA 4.5 - PERFIS LITOLÓGICOS DO SETOR JUSANTE NA MARGEM ESQUERDA (JE). ESQUEMA COM A REPRESENTAÇÃO DOS PERFIS (32-30), (243-244), (39-37) E (36-245).	23
FIGURA 4.6 - PERFIL LITOLÓGICO (217-248) NO SETOR JUSANTE DO SISTEMA AQUÍFERO.....	23
FIGURA 4.7 - PERFIL LITOLÓGICO (25-33,) REALIZADO NO SISTEMA AQUÍFERO.....	24
FIGURA 4.8 - PERFIS LITOLÓGICOS REALIZADOS NO SISTEMA AQUÍFERO: PERFIL 5 (87-111, MD); PERFIL 6 (91-104, MD-ME); PERFIL 7 (104-111, ME-MD); PERFIL 8 (91-111, MD); PERFIL 9 (89-104, ME).	25
FIGURA 4.9 - ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO SISTEMA AQUÍFERO UTILIZANDO O ALGORITMO <i>ORDINARY KRIGING</i> E RESPECTIVO MAPA DE PREVISÃO DOS ERROS.	26
FIGURA 4.10 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESPESSURA RELATIVA DO AQUÍFERO VERSUS AQUITARDO NOS 60 LOGS DE SONDAGENS ANALIZADOS.	27
FIGURA 4.11 - HISTOGRAMA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ESPESSURA PRODUTIVA DO SISTEMA AQUÍFERO DAS ALUVIÕES DO TEJO.	27
FIGURA 4.12 - MAPA COM ESTIMATIVA DA ESPESSURA PRODUTIVA DO SISTEMA AQUÍFERO ALUVIÕES DO TEJO, ESTIMADO POR <i>ORDINARY KRIGING</i>	28
FIGURA 4.13 – ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E MODELO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL DO SISTEMA AQUÍFERO ALUVIÕES DO TEJO.	29
FIGURA 4.14 - REPRESENTAÇÃO 3D DA PROFUNDIDADE DO AQUÍFERO ESTIMADO POR <i>ORDINARY KRIGING</i>	30
FIGURA 5.1 - NÚMERO DE ENSAIOS DE BOMBEAMENTO REALIZADOS POR CONCELHO ENTRE OS ANOS DE 1954 E 2005.	32
FIGURA 5.2 - HISTOGRAMA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DE CAUDAL DE BOMBAGEM (L/S/M) E DE REBAIXAMENTO (M), OBTIDOS A PARTIR DOS ENSAIOS DE BOMBEAMENTO (LNEG, 2019).	33
FIGURA 5.3 - LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE BOMBAGEM E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS VALORES DE CAUDAL ENSAIADO E REBAIXAMENTO REGISTADO, RETIRADOS DOS RELATÓRIOS DE ENSAIO DE BOMBEAMENTO (LNEG, 2019), E O SEU ENQUADRAMENTO NA REDE DE DRENAGEM DA BACIA DO BAIXO TEJO.	34
FIGURA 5.4 - POLÍGONOS DE THIESSEN - ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS REGISTOS DE CAUDAL ESPECÍFICO (M^2/DIA), SOBRE A REDE DE DRENAGEM DA BACIA DO BAIXO TEJO.	35
FIGURA 5.5 - MAPA DE ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE LOGAN OBTIDO PELO MÉTODO GEOESTATÍSTICO <i>ORDINARY KRIGING</i>	36
FIGURA 5.6 - MAPA DE ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQUÍFERO OBTIDO PELO MÉTODO GEOESTATÍSTICO <i>ORDINARY KRIGING</i>	38

FIGURA 5.7 - HISTOGRAMA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES ESTIMADOS PARA A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (M/DIA).	39
FIGURA 5.8 - HISTOGRAMA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO (M) E DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL DA ÁGUA (M), INVENTARIADOS A PARTIR DA REDE DE MONITORIZAÇÃO DA QUANTIDADE (SNIRH, 2019).	40
FIGURA 5.9 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS, MAPA DE INTERPOLAÇÃO PELO MÉTODO IDW E MDT. PIEZOMETRIA E A PROFUNDIDADE DO NÍVEL DA ÁGUA.	41
FIGURA 5.10 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO EM 11 PONTOS DE ÁGUA REFERENTE AOS ANOS HIDROLÓGICOS DE 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 E 2018/2019.	43
FIGURA 5.11 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL DA ÁGUA EM 11 PONTOS DE ÁGUA, REFERENTE AOS ANOS HIDROLÓGICOS 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 E 2018/2019.	44
FIGURA 6.1 - ANÁLISE FATORIAL DA CONCETRAÇÃO DOS IÕES DISSOLVIDOS NA ÁGUA.	48
FIGURA 6.2 - QUADRO COM A MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS.	49
FIGURA 6.3 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ALGUMAS DAS AMOSTRAS COM RESULTADOS MAIS RELEVANTES (ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS). COORDENADAS PLANIMÉTRICAS: HAYFORD GAUSS MILITAR DATUM LISBOA.	49
FIGURA 6.4 - GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DE BICARBONATO E O PH, E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA E A CONCENTRAÇÃO DE BICARBONATO.	51
FIGURA 6.5 - GRÁFICOS DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DO PH, E TABELA AUXILIAR COM INDICAÇÃO ENTRE A CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE ELES.	51
FIGURA 6.6 - ANÁLISE FATORIAL ENTRE A TEMPERATURA E: PIEZOMETRIA; PROFUNDIDADE DO NÍVEL DA ÁGUA; ESPESSURA PRODUTIVA E PROFUNDIDADE DA BASE DO AQUIFERO.	52
FIGURA 6.7 - TABELA DE CLASSIFICAÇÃO IÔNICA DA ÁGUA AMOSTRADA.	53
FIGURA 6.8 - DIAGRAMA DE PIPER. FÁCIES DA ÁGUA DAS AMOSTRAS AVALIADAS.	54
FIGURA 6.9 - DISTRIBUIÇÃO DA COMPOSIÇÃO IÔNICA MAIORITARIA E DIAGRAMA DE STIFF DAS AMOSTRAS DE ÁGUA AVALIADAS.	55
FIGURA 6.10 – RECONHECIMENTO DAS ELEVADAS CONCENTRAÇÕES DE CLORETO E SULFATO.	56
FIGURA 6.11 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA COM TEOR EM FERRO, MAIOR DO QUE O VALOR MÁXIMO ADMISSÍVEL (VMA). GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA E O FERRO.	57
FIGURA 6.12 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA COM TEOR EM MANGANÊS, MAIOR DO QUE O VALOR MÁXIMO ADMISSÍVEL (VMA). GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA E O TEOR EM MANGANÊS.	58
FIGURA 6.13 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA COM TEOR EM NITRATO, MAIOR DO QUE O VALOR MÁXIMO ADMISSÍVEL. GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA E O TEOR EM NITRATO.	59

ABREVIATURAS

RH5A - Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste

PCA - Principal Component Analysis

EEA - European Environment Agency

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

IGM - Instituto Geológico e Mineiro

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

WGS84 - World Geodetic System

COORD_X - Coordenada geográfica correspondente aos meridianos (X)

IDW - *Inverse Distance Weighting*

MDT – Modelo Digital de Terreno

COORD_Y - Coordenada geográfica correspondente aos paralelos (Y)

NHE - Nível hidrostático

NHD - Nível Hidrodinâmico

pH - Potencial Hidrogénico

k - Condutividade Hidráulica ou permeabilidade

vol.; v. - volume

s - segundo

ed. - edição

cap. - capítulo

cm - centímetro

d - dia

n - número de amostras

BD - Base de dados

L - litro

m - metro

slots - tubos-ralos

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A importância dos recursos hídricos, nomeadamente ao papel que representam no contexto do desenvolvimento sustentável e no âmbito das alterações climáticas, justificam o interesse da autora no tema, sugerido pela professora Doutora Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho e orientado também pela professora Doutora Maria Catarina Rosalino da Silva.

A excelência do corpo docente deste mestrado, combinado à oportunidade de contato com especialistas no assunto, nomeadamente, o Professor Doutor Carlos Costa Almeida, nas aulas especiais de hidrogeologia avançada, e com o Professor Doutor João José Lopo Mendonça, nas sessões de estudo de casos, serviram de suporte e motivação no desenvolvimento do trabalho.

Dos fundamentos considerados como referência para a pesquisa, destacam-se algumas das iniciativas que visam estabelecer as políticas de conservação dos recursos hídricos. Das iniciativas de desenvolvimento sustentável a nível mundial, a Agenda 2030 proposta pelas Nações Unidas (2015), tem, entre os 17 objetivos estabelecidos, o objetivo 6, denominado Água potável e saneamento, que propõe a implementação de uma gestão integrada dos recursos hídricos e o desenvolvimento de tecnologias de reutilização e reciclagem da água.

No cenário das alterações climáticas, Portugal é reconhecidamente um *hotspot* entre os países europeus com maior vulnerabilidade. Estudos recentes têm demonstrado modificações nas características dos fenómenos climáticos contabilizando um aumento na frequência e intensidade destes fenómenos, como os longos períodos de seca registados nos anos 1990 e 2012.

A diminuição da precipitação, ou a sua maior frequência e intensidade no Inverno e, ou grandes variações em curtos períodos, irá conduzir a um desequilíbrio no balanço hídrico. As culturas agrícolas também serão afetadas e terão maior dependência da rega, assim como a qualidade da água que está cada vez mais comprometida, quer diretamente pelo aumento da salinidade provocada pelo aumento das temperaturas, quer por intrusão marinha e a poluição antrópica.

Nesta perspectiva, esta dissertação visa contribuir para o conhecimento geológico e hidrogeológico do sistema aquífero Aluviões do Tejo, tendo como objetivo, propor um modelo, que caracterize geometricamente o sistema, o seu funcionamento hidráulico e a qualidade da massa de água.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O sistema aquífero Aluviões do Tejo desenvolve-se em formações aluvionares e em depósitos de terraços, situados nas margens do rio Tejo. Está geograficamente distribuído por 17 concelhos dos distritos de Lisboa e Santarém: Abrantes, Alenquer, Almeirim, Alpiarça, Azambuja, Benavente, Cartaxo, Chamusca, Constância, Coruche, Entroncamento, Golegã, Salvaterra de Magos, Santarém, Torres Novas, Vila Franca de Xira e Vila Nova da Barquinha (adaptado de Almeida *et al.*, 2000; Figura 2.1).

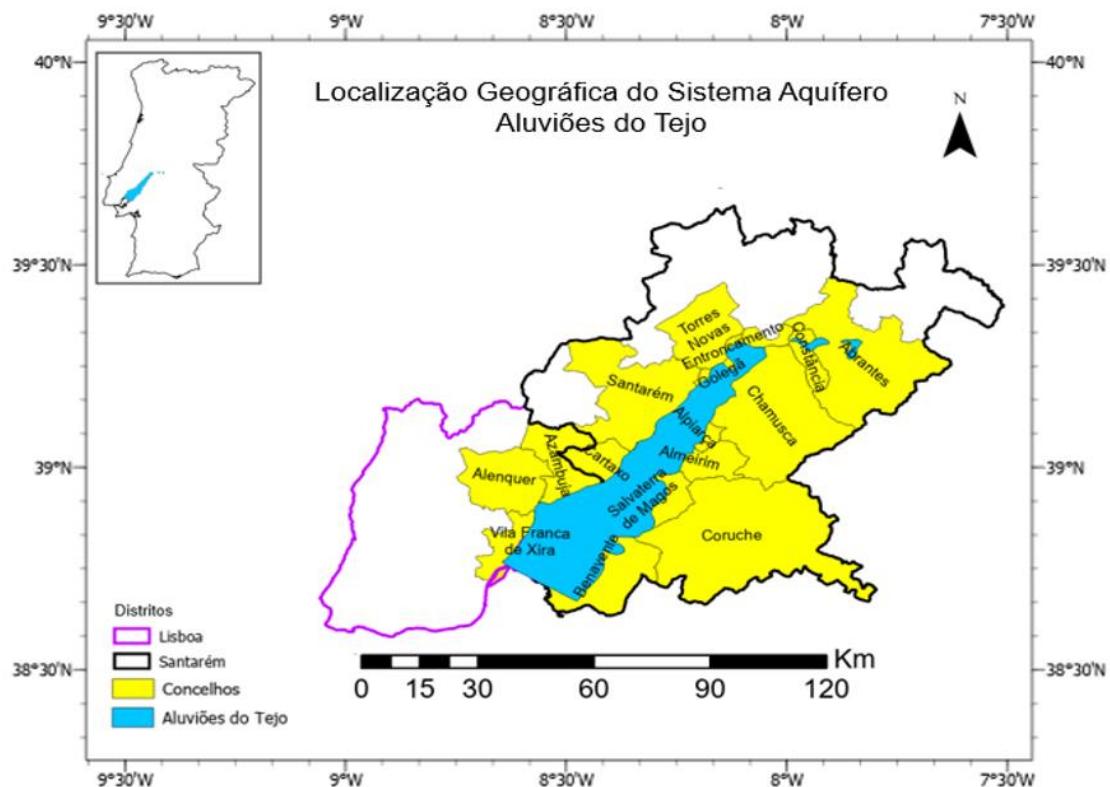


Figura 2.1 - Localização geográfica do sistema aquífero Aluviões do Tejo, adaptado de Almeida *et al.*, 2000.

A Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP, 2018¹) e a Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS2018²) produzidas pela Direção Geral do Território, foram utilizadas neste trabalho para a elaboração do mapa de enquadramento geográfico da área de estudo (Figura 2.1) e na construção da Carta de Uso e Ocupação do Solo da Lezíria do Tejo (Figura 2.2).

¹http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/ (Consultado em 09/02/2020)

²http://www.dgterritorio.pt/dados_abertos/cos/ (Consultado em 09/02/2020)

Os vértices do limite do sistema aquífero foram obtidos em formato *shapefile* através da plataforma do Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos (SNIRH-T7_aluvioesTejo³). O polígono ocupa uma área de 1113 km², 85 km de comprimento e largura máxima de 23 km na zona do estuário do rio Tejo, na bacia do Mar da Palha.

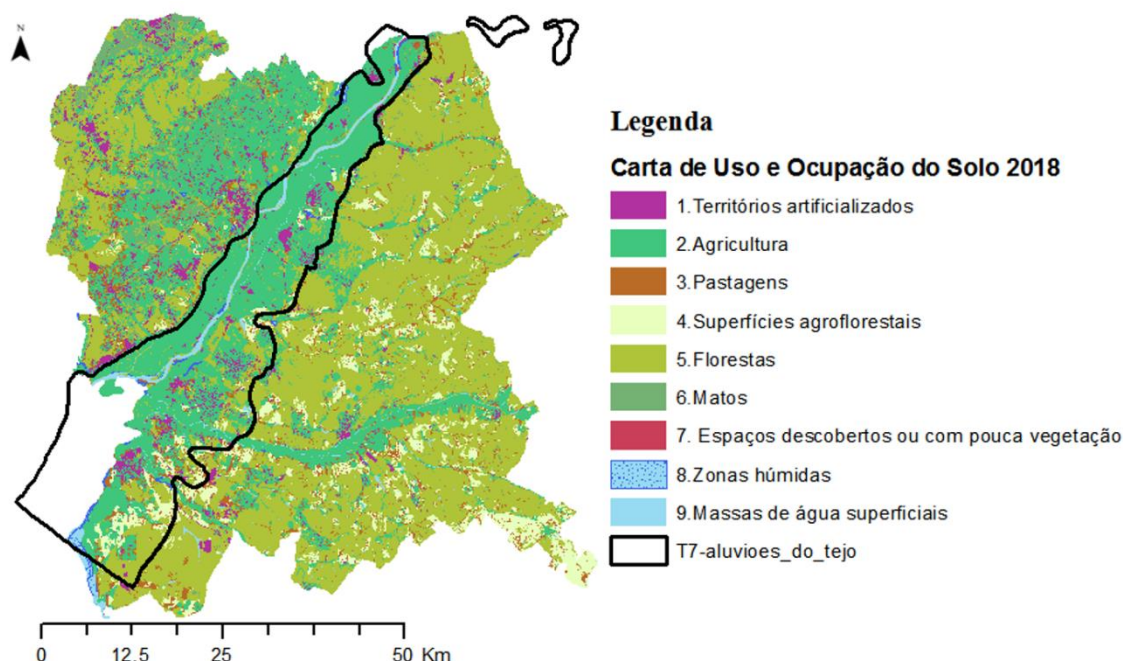


Figura 2.2 - Carta de Uso e Ocupação do solo (COS2018) da Lezíria do Tejo.

2.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

As Aluviões do Tejo são parte integrante da Bacia Tejo-Sado, onde afloram sedimentos cenozóicos que se sobrepõem a sedimentos mesozóicos da Bacia Lusitaniana desenvolvida na MOI (Margem Ocidental Ibérica) ocupando uma área aproximada de 20000 km² segundo a direção NNW-SSE (Kullberg *et al.*, 2006).

A Bacia Tejo-Sado evoluiu como depressão tectónica (grosso modo, de contorno retangular), alongada segundo a direção NE-SW, com o bordo Norte e a Oeste limitado por terrenos jurássicos e a Este e a Sul pelo Maciço Hespérico (Lobo-Ferreira, Oliveira & Ciabatti, 1995).

No interior desta Bacia, o conjunto sedimentar cenozóico encontra-se horizontal a ligeiramente inclinado, sendo preenchida por formações que vão do Paleogénico à atualidade, representado pelas seguintes unidades litoestratigráficas (Figura 2.3): Complexo de Ota (MO), Miocénico de Lisboa (ML) e Calcários de Santarém e Almoester (MST). Sobrepostos a estes depósitos, assentam sedimentos fluviais pliocénicos, nomeadamente, Conglomerados de Almeirim (PU) e Arenitos de Ulme (PAI), evoluindo para o Plistocénico com a deposição dos Terraços, Areias e

³ <https://snirh.apambiente.pt/snirh/atlasagua/sistemasaquiferos/vertices/T7.zip> (Consultado em 09/02/2020)

Cascalheiras (Q) e Holocénico com a deposição dos materiais mais recentes (A1) Terraços arenosos e Aluviões (a).

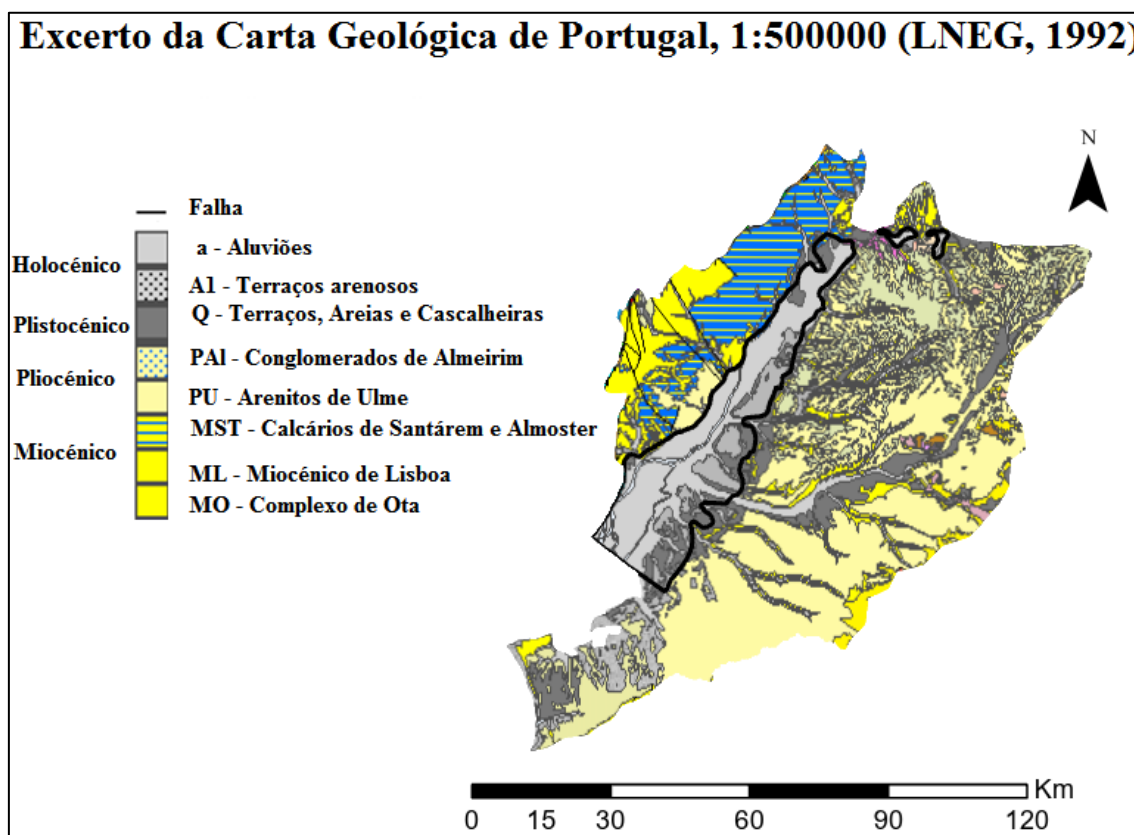


Figura 2.3 - Área de estudo delimitada sobre excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1:500000, WMS - Web Map Services⁴ (LNEG, 1992).

A interpretação do mapa acima, combinado com as notícias explicativas das Folhas 27-C (Manuppella *et al.*, 2006), 27-D (Gonçalves *et al.*, 1979), 30-D (Zbyszewski & Torre de Assunção, 1965), 31-A (Zbyszewski, 1953), 31-C (Zbyszewski & Veiga Ferreira, 1968), 34-B (Manuppella *et al.*, 2011) e 35-A (Zbyszewski & Veiga Ferreira, 1969) da Cartografia Geológica de Portugal, à escala 1:50000, permitiu o estudo espaço-temporal das unidades geológicas que constituem a área de interesse.

Ribeiro (1998) reconhece como limite entre o Pliocénico e o Miocénico, níveis carbonatados que na margem esquerda do rio Tejo, surgem sempre por baixo das areias pliocénicas. Na margem direita do Tejo após depósitos paleogénicos areno-margosos com intercalações calcárias estão os calcários de Santarém e Almoester. Noutros locais, as areias pliocénicas sobrepõem-se aos depósitos fluviais miocénicos com marcada ausência das assentadas calcárias superiores.

⁴ http://geoportal.lneg.pt/geoportal/destaques/servicos_mapas.html (Consultado em 09/02/2020)

As formações do Plistocénico representam retalhos de terrenos distribuídos espacialmente a montante da margem direita do rio Tejo e no setor centro-jusante da margem esquerda. São depósitos de terraços, areias e cascalheiras (Q), com espessuras que variam entre os 8 m e os 95 m, com larguras de até 5 km, e que ocorrem ao longo do vale do Tejo, desde a fronteira com a Espanha até Lisboa.

Estas formações são designadas como (Zbyszewsky, 1946; Mendonça, 1990): depósitos dos terraços de 8 m a 15 m (Tirreniano II ou baixos terraços); depósitos dos terraços de 25 m a 40 m (Tirreniano I ou Terraços médios); depósitos dos terraços de 50 m a 65 m (Siciliano II ou altos terraços); depósitos dos terraços de 75 m a 95 m (Siciliano I ou terraços superiores).

A Figura 2.4 a) apresenta o modelo teórico do mecanismo de formação dos depósitos de terraços fluviais e a Figura 2.4 b) a configuração do perfil teórico no contexto regional das vertentes do Vale do Tejo (Zbyszewsky, 1946; Mendonça, 1990).

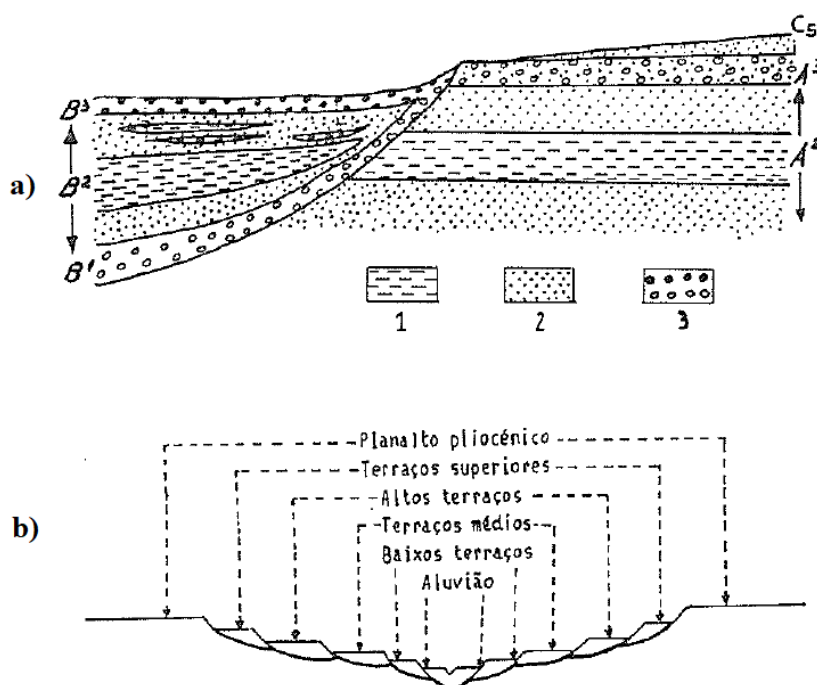


Figura 2.4 - a) Representação teórica do mecanismo de formação dos terraços fluviais; b) Configuração do perfil teórico das vertentes do vale do Tejo (Mendonça, 1990). A3 - seixos e calhaus do fim do ciclo; A2 - complexo interglaciário de enchimento; B1 - seixos e calhaus do início do ciclo, derivados de A3; B2 - complexo interglaciário de enchimento; B3 - seixos e calhaus do fim do ciclo, derivados de A3; C5 - depósitos resultantes da erosão das vertentes e depósitos eólicos contemporâneos de "B" ou posteriores. 1 - argilas; 2 - areias; 3 - seixos e calhaus.

Os depósitos de terraços, areias e cascalheiras (Q) são comumente representados por areias com calhau rolado acompanhadas por intercalações argilosas, cascalheiras, grés argilosos e argilas (acastanhadas ou avermelhadas), cascalheiras ferruginosas na base, areias, grés argilosos e argilas castanho-avermelhadas.

Assente sobre estes depósitos, formam-se coberturas espessas de material detrítico resultante da lavagem das superfícies arenosas dos depósitos pliocénicos. Estas coberturas são constituídas

por areias transportadas e depositadas pelas antigas cheias do rio Tejo (Zbyszewski, Manuppela & Veiga Ferreira, 1971), denominadas como terraços arenosos atuais (A1). Estas unidades, muito desenvolvidas na margem esquerda do rio Tejo, situam-se na superfície dos baixos terraços (Tirreniano II) e em parte dos terraços médios (Tirreniano I), escondendo por vezes os degraus de separação que os caracterizam.

A representação do Holocénico sob a forma das Aluviões do Tejo é caracterizada por areias, argilas, e seixos e calhaus (na base), todos contemporâneos do máximo de regressão marinha de Würm (Zbyszewski & Veiga Ferreira, 1969).

O trabalho de Vis & Kasse (2009), demonstra que a variabilidade espacial das argilas, areias e areias argilosas na Bacia do Baixo Tejo, está relacionada diretamente com a energia e a dinâmica da bacia ao longo da sua formação. A deposição destes sedimentos é resultado da descarga dos afluentes e da intensa e contínua entrada de sedimentos na bacia (favorecido pelo declive que se observa nos bordos e na grande disponibilidade de material detrítico que rodeia a Bacia do Baixo Tejo.

2.3. HIDROGRAFIA

A Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5A) é uma região hidrográfica internacional que integra a bacia hidrográfica do rio Tejo e ribeiras adjacentes, as bacias hidrográficas das Ribeiras do Oeste, as respetivas águas subterrâneas e águas costeiras adjacentes (conforme Decreto-Lei n.º 347/2007⁵, de 19 de outubro de 2007, alterado pelo Decreto-Lei n.º 117/2015⁶, de 23 de junho de 2015). O mapa apresentado na Figura 2.5 mostra a delimitação das massas de água subterrâneas que constituem a região hidrográfica.

⁵ <https://dre.pt/application/conteudo/629135> (Consultado em 09/02/2020)

⁶ <https://dre.pt/application/conteudo/67541744> (Consultado em 09/02/2020)

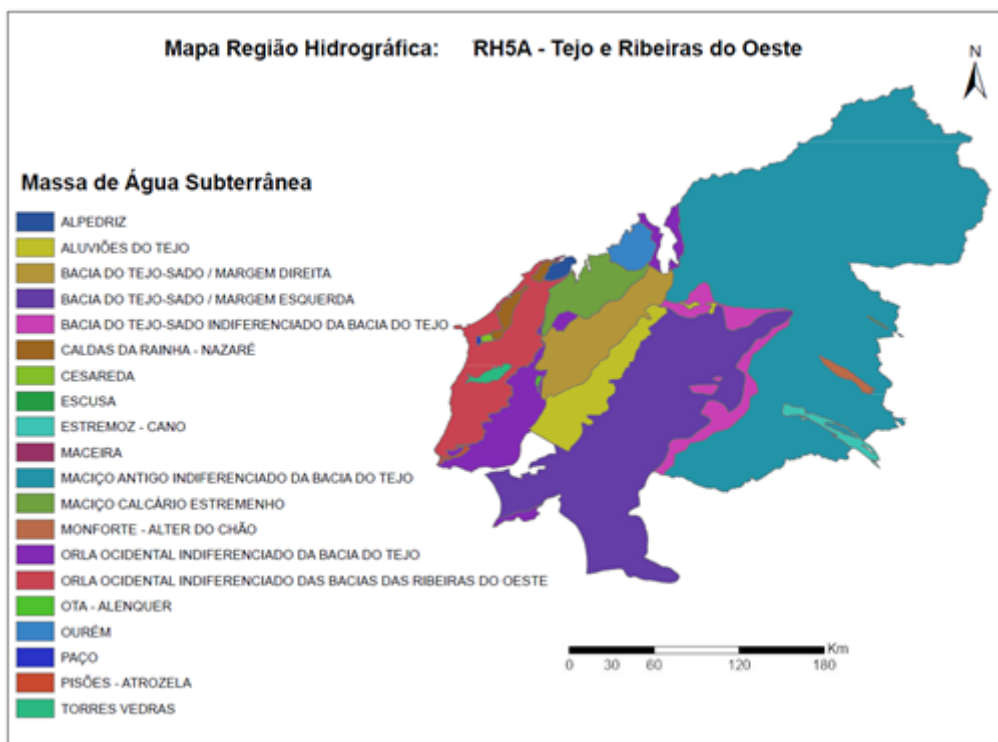


Figura 2.5 - Mapa da Região Hidrográfica RH5A - Tejo e Ribeiras do Oeste (EEA, 2019⁷).

A RH5A, explorada intensivamente para o abastecimento público de água, para a agricultura e para a indústria, é de grande representatividade geográfica, cultural e económica. Esta região destaca-se pela sua dimensão e potencialidade de recursos, uma vez que inclui a bacia hidrográfica mais importante do país, a Bacia do Tejo-Sado.

Em território nacional, o rio Tejo apresenta uma extensão que alcança os 273 km. Divide Portugal Continental em duas regiões distintas do ponto de vista orográfico e do clima, funcionando como limite que integra uma faixa de transição entre as zonas baixas do Sul e relevos mais acidentados a Norte.

Na sua margem direita, os principais afluentes são os rios Erges, Pônsul, Ocreza e Zêzere, tendo este último, maior representatividade quanto a dimensão da bacia e a área drenada. Estes cursos de água são responsáveis pela drenagem na zona periférica do Maciço Hespérico em rochas duras fraturadas (eruptivas e metamórficas), com relevo acidentado e vales bem encaixados.

Na margem esquerda, os rios Sever e Sorraia estão incumbidos da drenagem da Planície cenozóica do rio Tejo, que é constituída sobretudo por grés, calcários e margas, com espessura superior aos 450 m. Recebendo também a drenagem da peneplanície talhada nas formações xistentas e magmáticas intrusivas da zona de Ossa-Morena.

As formas de relevo dominante são a planície aluvial do Tejo, a planície de inundação, os depósitos de terraços, e os resquícios de uma morfologia dunar. Esta morfologia dunar levanta

⁷ http://cdr.eionet.europa.eu/help/WFD/WFD_521_2016/ (Consultado em 09/02/2020)

evidências da existência de um sistema dunar transgressivo (sentido NNW) que deverá ter sido originado num período em que o nível do mar estaria abaixo do atual (Zbyszewski, 1964).

As condições geomorfológicas condicionam a ocorrência e a circulação da água, em particular a infiltração. Na área de estudo, as variações altimétricas ultrapassam, muito raramente, os 50 m, caracterizando um relevo suave com superfícies sub-horizontais a planares. O suporte hidrogeológico maioritariamente poroso confere ao sistema uma heterogeneidade ímpar, capaz de ceder água em quantidades extraordinárias e com as mais diferentes fácies químicas.

2.4. HIDROGEOLOGIA

Do ponto de vista hidrogeológico o Sistema Aquífero Aluviões do Tejo está integrado na Unidade Hidrogeológica da Bacia Tejo-Sado, considerada o mais importante reservatório natural de águas subterrâneas do país (Figura 2.6).

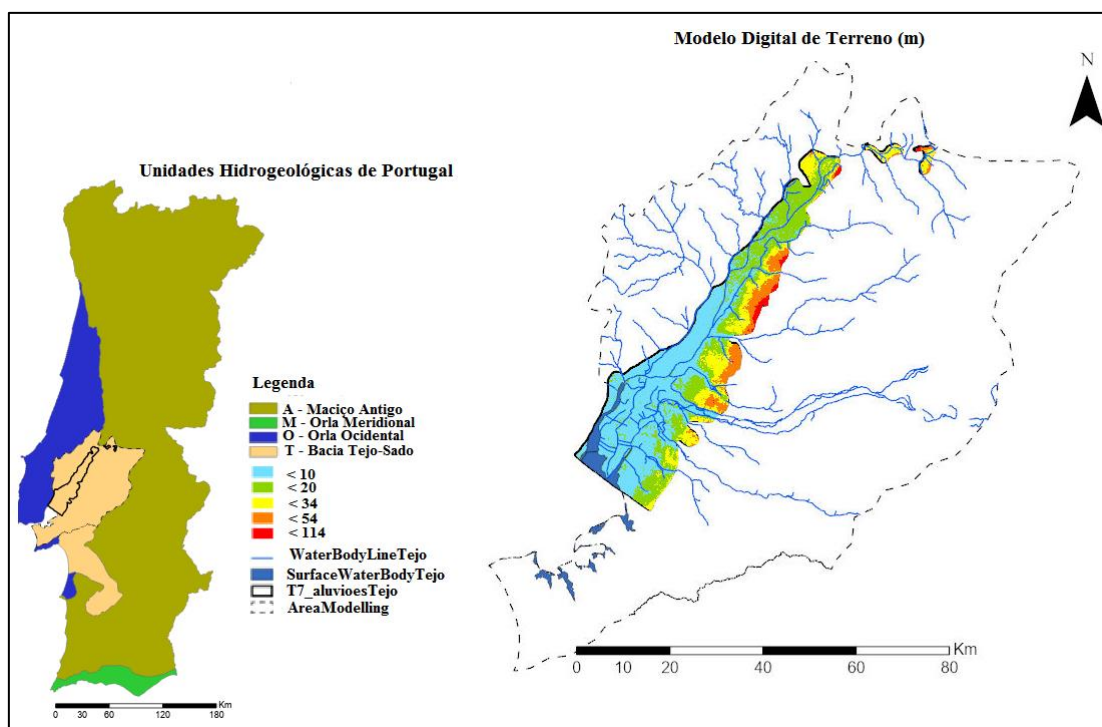


Figura 2.6 - Enquadramento hidrogeológico do sistema aquífero das Aluviões do Tejo dentro das Unidades hidrogeológicas de Portugal, à esquerda adaptado de Almeida *et al.*, (2000). Modelo Digital de Terreno⁸ e as redes de drenagem na Bacia do Tejo⁹, à direita.

⁸ <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d52d4dc61fac482ca95f1369df532d60> (Consultado em 09/02/2020)

⁹ http://cdr.eionet.europa.eu/help/WFD/WFD_521_2016/ (Consultado em 09/02/2020)

O sistema sobrepõe-se e contacta a sul com o denominado Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, e a norte com Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Direita (Almeida *et al.*, 2000).

O Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda é um sistema multi-aquífero, livre a confinado, em que as variações laterais e verticais de fácies litológicas proporcionam mudanças significativas nas condições hidrogeológicas. A fronteira com as Aluvies do Tejo é formada pelas formações areníticas do Pliocénico (*ibidem*).

O Sistema Aquífero da Bacia do Tejo-Sado/Margem Direita é composto por formações do Miocénico que formam um sistema multicamada caracterizado pela alternância de níveis de elevada permeabilidade, constituídos por (arenitos e calcários) e níveis de permeabilidade baixa formados por argilas e margas (*ibidem*).

O sistema aquífero em estudo é constituído por formações aluvionares do Holocénico e terraços fluviais do Plistocénico (*ibidem*). Do topo para a base, as litologias são, predominantemente, compostas por areias, argilas e seixos e calhaus na base.

Um modelo de funcionamento hidráulico para a Bacia do Tejo-Sado (Figura 2.7) é proposto por Mendonça (2010). O autor admite a interconexão hidráulica dos três sistemas aquíferos (formações do Holocénico/Plistocénico, Pliocénico e Miocénico) e considera as formações argilosas como aquíferos dentro deste aquífero regional.

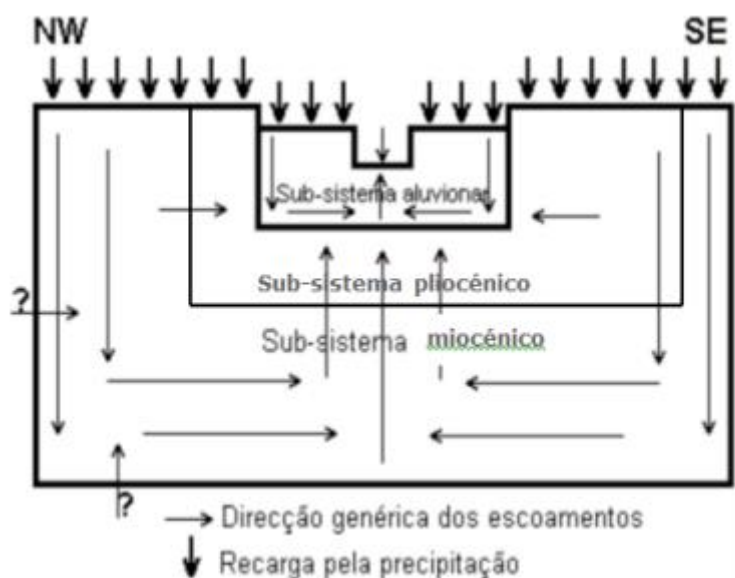


Figura 2.7 - Modelo conceitual dos aquíferos da Bacia do Tejo-Sado, Mendonça (2010).

Neste modelo de aquífero regional, o escoamento subterrâneo ocorre dos bordos em direção ao eixo longitudinal de drenagem, o rio Tejo (zona de descarga mais importante). A horizontalidade das camadas e o suporte geológico poroso favorecem a conectividade das zonas de descarga com o rio principal. O mesmo autor sublinha que a sobreexploração do sistema

aquífero terciário poderá vir de fato a comprometer o sentido do fluxo original, uma vez que o sistema aquífero aluvionar recebe o fluxo proveniente dos outros aquíferos.

O enquadramento do sistema aquífero Aluviões do Tejo, junto à rede de drenagem e ao modelo digital de terreno, permite observar a densidade de cursos de água que descarregam dentro da área de estudo, e permite aferir o quanto o sistema sofre influência da topografia no fenómeno do escoamento. As porções em que se verificam maiores relevos estão relacionadas com os depósitos de terraços da margem esquerda do rio Tejo e com os terrenos mais antigos que tangenciam o sistema.

A espessura do aquífero é variável e, por vezes, difícil de definir. No entanto, existe uma tendência observada para valores mais baixos, na parte centro-montante e na margem direita do rio Tejo, bem como, para valores mais elevados, na parte centro-jusante e margem esquerda. Em algumas áreas, o limite superior do aquífero é o nível freático, caracterizando um aquífero livre. Em outras áreas, o sistema apresenta feições que permitem caracterizá-lo como confinado, ou mesmo semi-confinado, estando limitado superiormente ou inferiormente por um aquífero (Lobo-Ferreira, Oliveira & Ciabatti, 1995).

Almeida *et al.*, (2000) refere para o sistema aquífero valores de transmissividade hidráulica, entre 6 m²/dia e 5.794 m²/dia, com um valor médio de 1.585 m²/dia. Essa gama de valores indica uma capacidade transmissiva elevada e de grande heterogeneidade.

Na margem direita do rio Tejo (entre Azambuja e Vila Nova da Rainha), são conhecidos níveis produtivos situados entre 15 m e 25 m de profundidade, com caudais da ordem dos 5 a 8,3 L/s e rebaixamentos entre 1 m a 2 m. Nas proximidades do Carregado e de Alenquer, existem numerosos furos de captação de água com profundidades que vão dos 27 m a 150 m. Os níveis produtivos encontram-se entre 15 m e 40 m, e entre 83 m e 87 m de profundidade. Os caudais extraídos variam entre 0,3 e 2,5 L/s (Zbyszewski, Manuppela & Veiga Ferreira, 1971). Este mesmo trabalho reporta outras captações com caudais de 4 a 10 L/s e rebaixamentos entre 1 m a 6 m.

2.5. QUALIDADE DA ÁGUA

A Bacia do Tejo está sendo contaminada por diferentes fontes de poluição. A deterioração da qualidade da massa de água subterrânea vem sendo provocada principalmente pelo uso intensivo de fertilizantes e pesticidas (Mendonça, 2018). A contaminação por práticas agrícolas apresenta um carácter difuso, persistente, e que abrange extensas áreas. O uso intensivo de fertilizantes inorgânicos como o amoníaco, sulfato de amónio, nitrato de amónio e orgânicos, como a ureia, além dos pesticidas, provocam a deterioração da qualidade da massa de água subterrânea, e podem representar riscos para o consumo humano. Os estudos realizados por Almeida *et al.*, (2000) demonstram, que a qualidade da massa de água do sistema aquífero encontra-se comprometida por estas substâncias.

No setor jusante do sistema aquífero, tem-se constatado a ocorrência cada vez mais frequente do fenómeno de intrusão marinha (Mendonça, 2018), estando o sistema, como um todo, no alvo

das medidas de controlo e monitorização da qualidade da água pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA¹⁰, dados disponíveis em SNIRH¹¹).

Mendonça (2018) refere registos de concentrações de ferro e manganês pouco compatíveis com com os valores máximos recomendados para o consumo humano. A presença de matéria orgânica nos lodos promove condições de oxi-redução que favorecem a dissolução daqueles elementos.

A notícia explicativa da Carta Geológica da Folha 34-B (Loures) relata a existência de potenciais recursos hidrominerais e águas de nascente, tendo sido algumas delas concessionadas para exploração comercial ou utilizadas em termas, como é o caso da nascente inserida na propriedade Mouchão da Póvoa. Nesta nascente foram instaladas captações em poços artesianos (com 46 m de profundidade), a curta distância do Rio Tejo, apresentando uma água cloretada sódica e magnesiana, sulfatada cálcica, com temperatura de 18,6°C e pH igual a 6,9 (Kullberg *et al.*, 2006).

A Figura 2.8 extraída de Mendonça (2018) apresenta fácies da água dos furos instalados no campo de captações de Valada I.

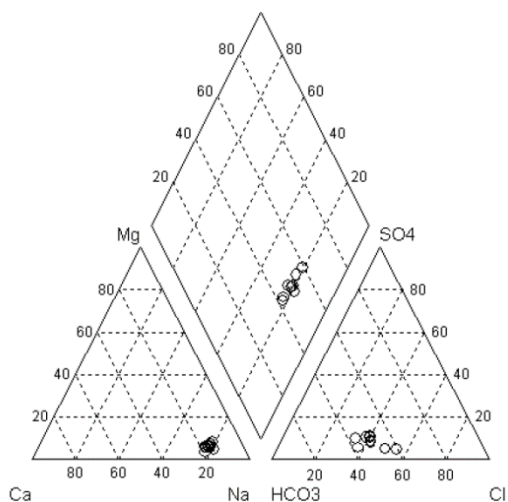


Figura 2.8 - Fácies da água dos furos de captação de Valada I (Mendonça, 2018).

Da análise, verifica-se que a percentagem de sódio é dominante (80%), e entre os aniões há predominância do cloreto e bicarbonato.

As águas dos terraços a jusante na margem direita do rio Tejo são as de melhor qualidade (Mendonça, 1990; Mendonça, 2018) caracterizando-se como águas cloretadas sódicas. Em Azambuja/Carregado, o autor refere elevados valores de sulfato (1.320 mg/L), cálcio (340 mg/L) e magnésio (125 mg/L). Tais valores tipificam situações de poluição relacionadas a unidades industriais instaladas no local (*ibidem*).

¹⁰ <https://apambiente.pt/>

¹¹ <https://snirh.apambiente.pt/>

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DADOS DISPONÍVEIS

Alcançar os objetivos propostos nesta dissertação, passa pela construção de uma base de dados local (*BD_Aluvioes*), utilizando os dados inventariados nas Bases de dados de Recursos Hidrogeológicos Portugueses¹² sob a direção do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) e dos dados inventariados na base de dados online do SNIRH.

Os dados incluem *logs* de sondagens (SNIRH) com informação detalhada da geologia, relatórios de ensaios de bombeamento e boletins de análise físico-química (LNEG), e dados relativos à qualidade e quantidade (rede de monitorização do SNIRH).

Os dados inventariados, o número de registos e a sua aplicação, são os seguintes:

- *Logs* de Sondagens (60) - Estimativa da profundidade da base do aquífero e da sua espessura produtiva;
- Ensaios de Bombeamento (60) - Interpolação dos valores do caudal e do rebaixamento, e a previsão dos valores para a transmissividade Logan e condutividade hidráulica;
- Monitorização Quantidade: Piezometria (37) e profundidade do nível da água (82) - Análise da evolução temporal;
- Monitorização Qualidade: Composição iónica maioritária (75), grandezas físico-químicas (75) e substâncias indesejadas (75) - Avaliar o estado químico da água.

A localização dos pontos de água em estudo, encontram-se representados espacialmente no mapa Figura 3.1.

¹² http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/bds/pontos_agua/default.aspx (Consultado em 23/02/2020)

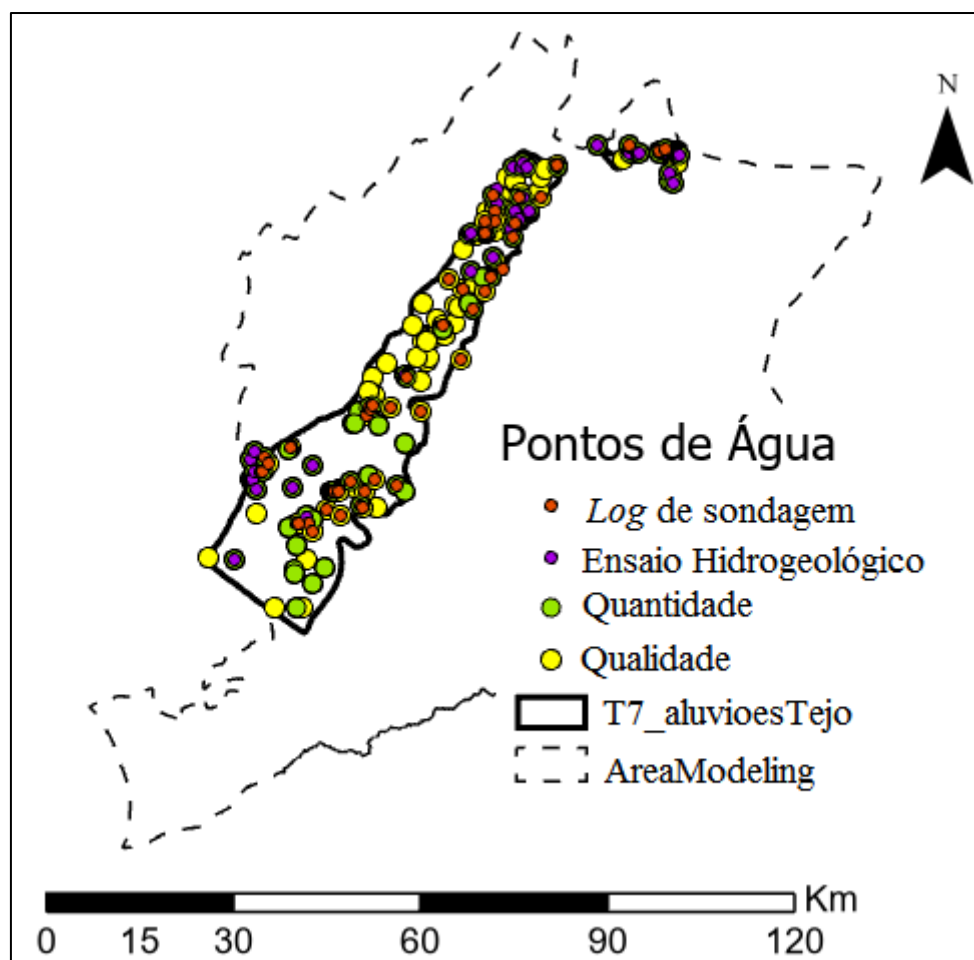


Figura 3.1 - Localização dos pontos de água com informação hidrogeológica utilizada neste trabalho. Distribuição espacial das amostras (Bases de dados de Recursos Hidrogeológicos Portugueses sob a direção do LNEG e dos dados inventariados na base de dados online do SNIRH).

Os dados inventariados incluem informação presente em relatórios técnicos de sondagens hidrogeológicas realizadas a partir do ano de 1954. As sondagens foram executadas, com o objetivo de pesquisar e captar água, por empresas especializadas no setor, nomeadamente a Keller Group (UK), Hidroeste, A. Cavaco, Personda e Teixeira Duarte.

As bases de dados consultadas fornecem:

- Localização administrativa, coordenadas geográficas (latitude/longitude): Datum WGS84;
- Coordenadas Planimétricas (COORD_X/COORD_Y): Hayford Gauss Militar Datum Lisboa;
- Descrição das formações geológicas atravessadas;
- Profundidade de perfuração e material de preenchimento;
- Diâmetro, altura e posição dos tubos ralos;
- Designação do tipo de ensaio de bombeamento;
- Nível hidrodinâmico (NHD), nível hidrostático (NHE) e caudal de bombagem.

A rede de monitorização do SNIRH inclui um conjunto de estações onde foram ou ainda são monitorizados parâmetros da quantidade e da qualidade da água. Para a análise da evolução temporal da piezometria, extraíram-se dados do período de 01/10/2015 a 30/09/2019, referentes a quatro anos hidrológicos (2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019), em 11 furos e poços distribuídos pela área de estudo.

A base de dados hidrogeológica do LNEG também disponibiliza resultados de análise físico-química realizados nos últimos 50 anos. Estes, também foram inventariados e agregados à base de dados local.

Os parâmetros a serem avaliados relativamente à quantidade e à qualidade da água subterrânea aluvionar são os seguintes:

- A piezometria e a profundidade do nível da água;
- Grandezas físico-químicas: Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH e temperatura da amostra ($^{\circ}\text{C}$);
- Composição iónica maioritária (Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , HCO_3^-);
- Substâncias indesejadas, tais como o nitrato ($\text{mg}/\text{L NO}_3^-$), ferro (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) mg/l e manganês (Mn^{2+}) mg/l .

3.2. METODOLOGIA

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, o modelo de desenvolvimento das atividades pode ser resumido no diagrama da Figura 3.2.

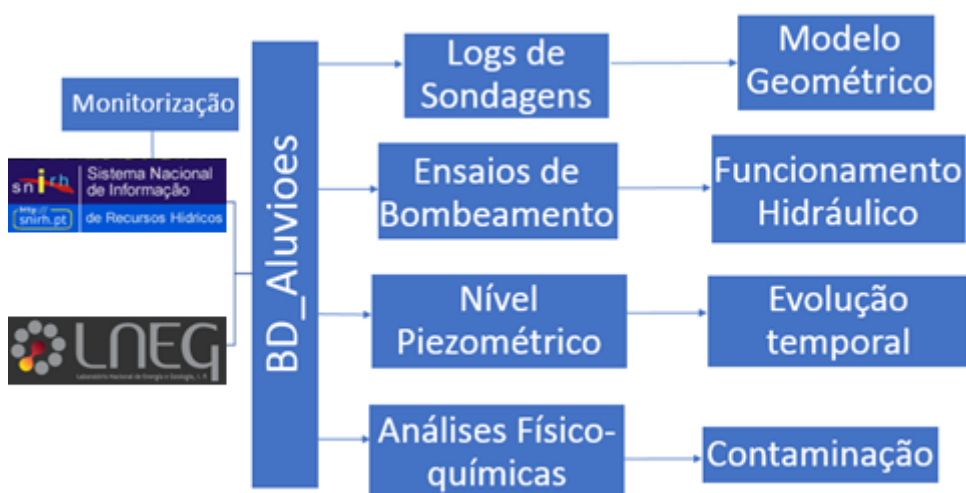


Figura 3.2 - Esquema representativo do algoritmo de desenvolvimento do presente trabalho.

O estudo do sistema aquífero aluvionar tem por base a inventariação e o processamento de dados de pontos de água subterrânea, poços e furos existentes na área de interesse.

As principais tarefas incluem:

- Inventariação, tratamento dos dados e análise exploratória;
- Estudo dos logs de sondagem, construção dos perfis geológicos e do modelo geométrico tridimensional;
- Interpretação dos ensaios de bombeamento e a estimativa de parâmetros hidráulicos;
- Processamento dos dados de piezometria e a sua análise temporal;
- Caracterização físico-química, fácies da água e pontos de contaminação.

No desenvolvimento da metodologia foram utilizados os seguintes softwares:

Andad 7.11[®] (CVRM/IST, 2000 - Open source)

ArcGis[®] (Licença de estudante)

BGS GROUNDHOG[®] (Community License)

Microsoft Office Excel[®] (Licença de estudante)

QualiGraf[®] 1.1v (FUNCEME - 2018, Open source)

3.2.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

As técnicas de análise exploratória constituem ferramentas que auxiliam na apresentação, visualização e sintetização da informação. É a etapa em que se estudam as propriedades dos dados. É neste momento que se verifica a existência de *outliers* e valores anómalos, deteta-se padrões espaciais, observa-se comportamentos médios, quantifica-se a dispersão e a variabilidade.

As ferramentas disponíveis nos sistemas de informação geográfica permitem computar matematicamente o comportamento espacial dos dados e a sua modelação. Com a construção de histogramas, *scatterplots* e mapas de valores, obtém-se resumos gráficos da informação. Através de métodos estatísticos, faz-se a descrição das variáveis, apresentando, através de um único valor, o retrato das propriedades dos dados.

Utilizando o Microsoft Excel[®] e o ArcGis 10.6[®], faz-se a análise exploratória univariada dos elementos considerados como variáveis-chave: a profundidade da base do aquífero das Aluviões do Tejo obtida pela interpretação dos logs de sondagem; o caudal de bombagem obtido nos ensaios de bombeamento; e a transmissividade Logan obtida por computação matemática dos dados de rebaixamento e os valores de caudal.

Na representação espacial em mapa de valores, optou-se por utilizar o método de classificação *Natural Breaks Classification (Jenks or Optimization)*, em vez do método *Quantile*. O primeiro método funciona no sentido de otimizar o arranjo ou agrupamento dos valores, fazendo com que o conjunto seja o mais similar possível, enquanto que o segundo, divide por igual o conjunto de amostras pelo número de classes, sendo influenciado por valores extremos.

3.2.2. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E GEOESTATÍSTICA

A interpolação espacial tem como *input* um conjunto de pontos (amostras) localizados no espaço e dotados de informação de natureza contínua, e tem como *output*, um modelo espacial de dados que apresenta a estimação dos valores de determinada variável em localizações não amostradas (Costa, 2009).

A modelação de processos espaciais pode ser computada através de métodos determinísticos e estocásticos. Nos métodos determinísticos, o valor estimado para cada localização corresponde a uma variável determinística. Nos métodos estocásticos, o valor estimado em dada localização, tem a si associada uma distribuição de probabilidades. Este último método tem em conta a configuração espacial das amostras e a sua autocorrelação.

A autocorrelação espacial ou global baseia-se no grau de semelhança que dado fenómeno apresenta em determinado local e nas suas proximidades. Um fenómeno com baixo grau de dependência espacial muda rapidamente num curto intervalo de distância, enquanto um fenómeno que apresenta um alto grau de dependência espacial tem suas características alteradas mais suavemente (Briggs, 2012).

A interpolação espacial utilizando interpoladores exatos, como os métodos de *Thiessen Polygons*, *Inverse Distance Weighting* e *Ordinary Kriging*, garante que o valor estimado para cada localização amostrada é igual ao valor observado da amostra (Costa, 2009).

Os polígonos de Thiessen (*Thiessen Polygons*) permitem entre outros tipos de análise, a visualização da influência local de uma dada amostra. O algoritmo processa a interpolação pelo método de triângulação, associando à localização não amostrada o valor da amostra mais próxima. Cada polígono contém apenas uma amostra, e qualquer ponto desse polígono está mais próximo do valor dessa amostra, do que do valor da amostra de qualquer outro polígono (Costa, 2016).

O método *Inverse Distance Weighting* cria superfícies com base num grau de semelhança, em que cada amostra pertencente à vizinhança do ponto a estimar está associado a um peso que considera o inverso da distância ao ponto a estimar, elevada a uma potência. Neste presente estudo, utilizou-se o inverso do quadrado da distância que considera a potência de dois e escreve-se segundo a equação 3.1 (*ibidem*):

$$Z^*(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (3.1)$$

Em que $Z^*(x_0)$ é o valor estimado para o atributo na localização x_0 , $z(x_i)$ é o valor do atributo para a amostra localizada em x_i , e d_i é a distância ao ponto a estimar.

Através das operações de validação cruzada, é possível a comparação do impacto de diferentes estratégias de modelação nos resultados (Falivene *et al.*, 2010; Bofana & Costa, 2017). O erro de estimação dado pela diferença entre o valor estimado $Z^*(x_0)$ e o valor observado $z(x_i)$,

permite verificar o enviesamento das estimativas, e a sua precisão pode ser verificada pelo valor da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE - Root Mean Square Error).

O estudo geoestatístico integra a análise e a previsão de valores de uma variável distribuída no espaço, e permite aferir informação acerca da existência de autocorrelação ou de dependência espacial entre os próprios objetos e entre os seus vizinhos (Soares, 2000). O método geoestatístico (estocástico) abordado será o *Ordinary Kriging*.

Os indicadores de correlação espacial (variograma) são também designados por indicadores de autocorrelação, porque quantificam a dependência espacial da mesma variável, mas medida em locais distintos. Esta característica diminui com o aumento da distância numa dada direção (*ibidem*).

O modelo de variograma explica a variabilidade espacial e o quão diferente são os valores. Os valores do variograma experimental são ajustados por uma função e pelos seguintes parâmetros:

- Amplitude ou Range (a) - distância a partir da qual já não existe evidência de correlação espacial;
- Patamar ou Sill (C) - representa a variabilidade máxima na ausência de dependência espacial;
- Efeito pepita ou nugget (C_0) - é um valor constante que pode ser adicionado à função em inúmeras situações, como quando se sabe que o fenómeno apresenta variabilidade elevada a curtas distâncias e ou, a falta de amostras em certo local é fator de variabilidade elevada nas estimações.

Algumas funções que podem descrever o modelo teórico são as seguintes:

- Modelo Esférico - é uma função polinomial de grau três;
- Modelo Exponencial - o valor do variograma nunca atinge o patamar que é uma assíntota;
- Modelo Gaussiano - tem forma parabólica junto à origem, e o valor do variograma atinge cerca de 95% do patamar.

O sistema de ponderação *kriging* tem em conta a proximidade estrutural dos dados em relação à localização que está a ser estimada (Costa, 2009). A variância *kriging* aumenta sob duas condições, uma quando a correlação entre as amostras aumenta (estimação mais precisa se as amostras não estiverem agrupadas) e outra quando a correlação entre o ponto a estimar e as amostras diminui (estimação mais precisa quando as amostras estão mais próximas da localização a estimar).

O método *Ordinary Kriging* calcula o valor mais provável de uma variável aleatória Z , numa localização não amostrada x_0 , onde se aplicam ponderadores (pesos) às n amostras vizinhas, escrevendo-se na seguinte forma (equação 3.2, Durão *et al.*, 2009):

$$Z * (x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad (3.2)$$

A aplicação do estimador de krigagem assume que a variável aleatória Z^* , na área de estudo é estacionária, isto é, tem média constante e flutuações locais (resíduo). Assim, a estimação quantifica as flutuações locais em torno da média que no final são somadas à média estacionária desconhecida (*ibidem*).

Métodos determinísticos e estocásticos foram utilizados na construção do modelo geométrico do sistema aquífero, estimando a profundidade da base e a sua espessura produtiva, e na caracterização do seu funcionamento hidráulico, estimando valores para a transmissividade (obtida pelo método de Logan) e a condutividade hidráulica.

4. MODELO GEOMÉTRICO

4.1. ESTUDO DE *LOGS* DE SONDAGENS

Relatórios técnicos de sondagens que exibem um registo contínuo da geologia em função da profundidade, são peças fundamentais para a construção de modelos geológicos. No presente estudo, a interpretação dos *logs* de sondagens com suporte às cartas geológicas e respetivas notícias explicativas, permitiu o reconhecimento das unidades estratigráficas, o diagnóstico dos níveis produtivos e a construção do modelo geométrico.

Foram estudados 60 *logs* de sondagens de pesquisa e captação com registo da litologia. A profundidade máxima destas sondagens é de 450 m e a mínima de 17,5 m. São furos de captação de água que existem dentro da área de estudo, mas nem todos a captam exclusivamente as aluviões. A consideração dos furos mais profundos está meramente relacionada com a informação geológica que fornecem.

No anexo do trabalho encontram-se alguns dos *logs* de sondagens inventariados. A secção está organizada por região e carta geológica¹³.

4.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO AQUÍFERO

A profundidade da base do sistema aquífero foi definida a partir do estudo dos *logs* de sondagens. Com o objetivo de sintetizar a informação inventariada, apresenta-se na Figura 4.1 o respetivo histograma com valores para: média aritmética, desvio padrão, valores mínimo e máximo, mediana, coeficiente de Skewness, curtose e quartis.

¹³ Alguns dos *logs* de sondagens inventariados encontram-se em [anexo](#)

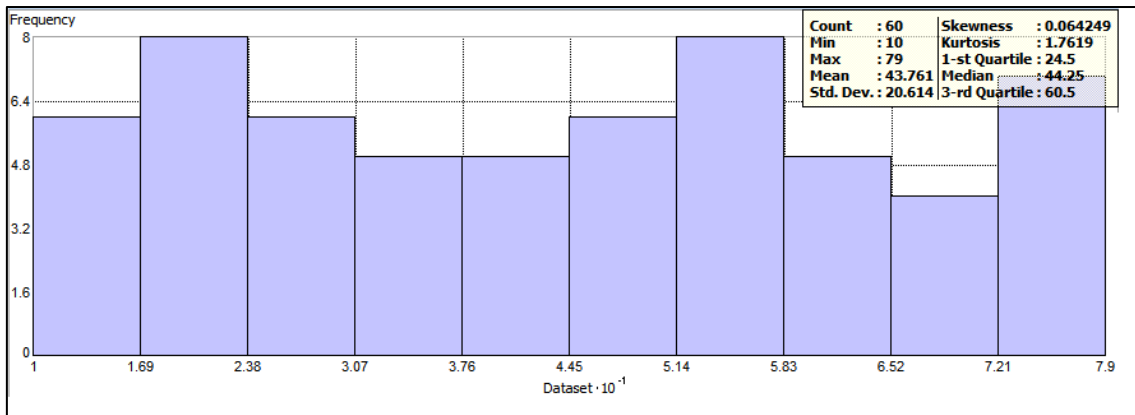


Figura 4.1 - Histograma e análise estatística da profundidade da base do sistema aquífero, com base na análise de 60 de logs de sondagem executadas na área do sistema aquífero Aluviões do Tejo.

O desvio padrão, como forma de aferir o grau de dispersão dos valores em torno da média, permite levantar hipóteses sobre a variabilidade dos dados. O coeficiente de variação obtido pela divisão entre o desvio padrão e a média (calculado em percentagem 47,11 %) fornece indicações sobre a homogeneidade dos dados.

Pelo valor da mediana verifica-se que até 50% das amostras (sondagens) apresentam profundidade inferior ou igual a 44,25 m. O primeiro quartil, igual a 24,5 m, significa que 25% das amostras tem profundidade inferior a este valor, e o terceiro quartil quantifica que 25% das amostras (correspondente a 15 observações) têm profundidade superior a 60,5 m com um valor máximo de 79 m.

A Figura 4.2 permite concluir que as amostras utilizadas para estimar a profundidade da base do aquífero, de facto apresentam autocorrelação espacial. O p-value apresenta um valor muito próximo de zero (0,000119) indicando um nível de confiança superior a 95% na hipótese de que existe correlação espacial entre as observações.

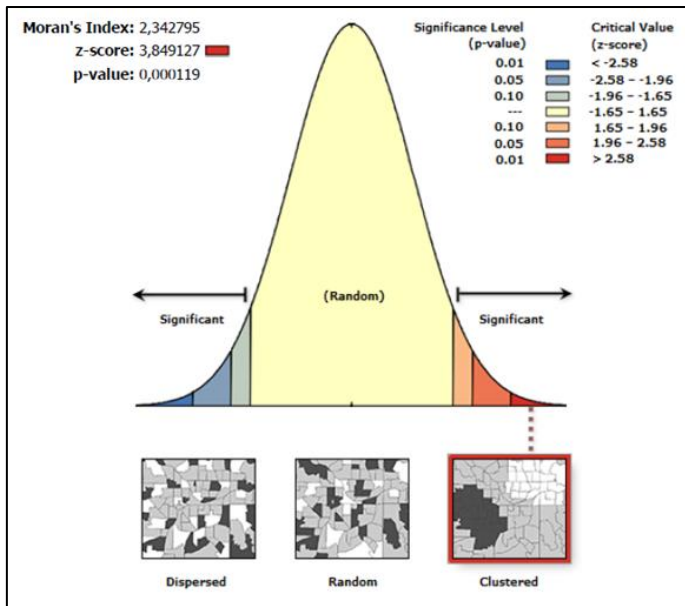


Figura 4.2 - Análise de padrões e autocorrelação espacial das amostras com valores da profundidade da base do aquífero.

O mapa da Figura 4.3 apresenta a localização dos *logs* de sondagens inventariados, enquadrados na rede de drenagem principal da Bacia do Baixo Tejo.

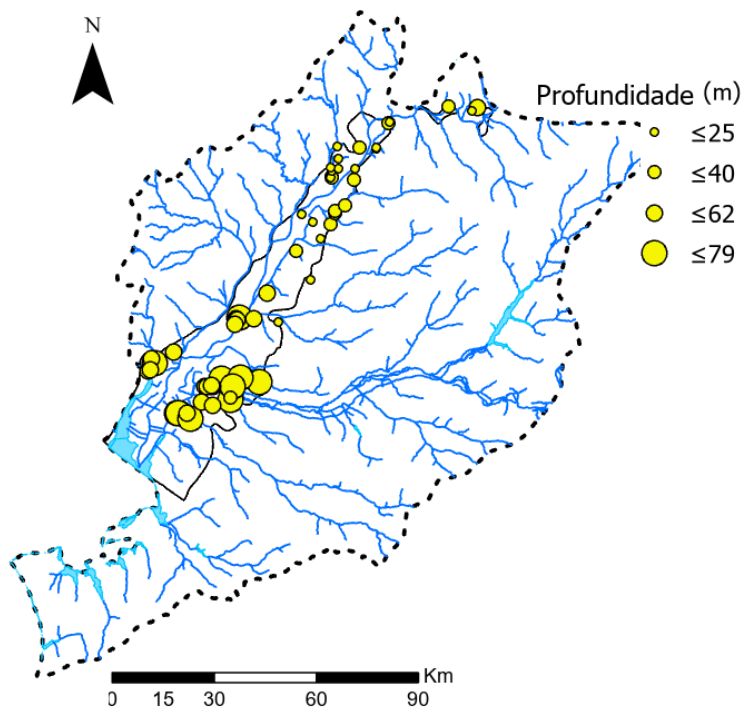


Figura 4.3 - Mapa da localização dos *logs* de sondagens e o seu enquadramento na rede de drenagem principal da Bacia do Baixo Tejo.

O mapa elaborado divide as 60 amostras entre quatro classes, de acordo o método *Natural Breaks Classification (Jenks)*, em que os dados são agrupados no sentido de maximizar as diferenças entre classes para que o conjunto seja o mais similar possível.

As maiores profundidades encontram-se na zona jusante da área de estudo na margem esquerda do rio Tejo, em afloramentos de depósitos de terraços, areias e cascalheiras (Q) do Plistocénico que comumente aparece coberto pelas areias superficiais do Holocénico. São ainda observados nesta zona, valores menores que se referem às espessuras das aluviões da planície aluvial do Tejo e ou da planície de inundação, e às linhas de água de afluentes que constituem a rede de drenagem.

A partir da zona central para a montante, verifica-se a predominância dos menores valores para a profundidade. Estão representados, essencialmente, pelas aluviões do eixo longitudinal de descarga (rio Tejo), a planície aluvionar e a planície de inundação.

4.3. PERFIS LITOLÓGICOS NO SISTEMA AQUÍFERO DAS ALUVIÕES DO TEJO

A Tabela 1 apresenta uma breve descrição dos *logs* de sondagens utilizados na construção dos perfis geológicos. Alguns destes *logs* podem ser consultados com maior detalhe no Anexo a este Relatório.

Tabela 1 - Descrição dos *logs* de sondagens utilizados na construção dos perfis geológicos. Legenda: profundidade estimada da base do aquífero (Prof. Base); cota topográfica (Cota); divisão cartográfica da Carta Geológica de Portugal (Folha); geologia de superfície (Geologia); informação relativa a captação (Captação); posição geográfica na área de estudo (Setor). a - Aluviões; A1 - Terraços arenosos atuais; Q - Terraços, areias e cascalheiras; t - terciário; JE - jusante-esquerda, CD - centro-direita; MD - montante-direita; ME - montante-esquerda.

Furo	Prof. Base (m)	Cota (m)	Folha	Geologia	Captação	Setor
32	50	15	<u>31-C Coruche</u>	Q	t	JE
30	57	11	<u>31-C Coruche</u>	A1	t	JE
243	55	14	<u>31-C Coruche</u>	a	a	JE
244	52	13	<u>31-C Coruche</u>	a	a	JE
39	67	9	<u>31-C Coruche</u>	a	a	JE
37	76	19	<u>31-C Coruche</u>	Q	t	JE
36	40	11	<u>31-C Coruche</u>	Q	a	JE
217	74	5	34-B Loures	A1	t	JE
248	70	6	34-B Loures	A1	t	JE
245	78	15	<u>31-C Coruche</u>	Q	t	JE
33	50	19	35-A Santo Estevão	A1	t	JE
25	0	20	<u>31-C Coruche</u>	a	a	CD
87	20	13	<u>27-C Torres Novas</u>	a	t	MD
89	39	12	<u>31-A Santarém</u>	a	t	ME
91	22	13	<u>27-C Torres Novas</u>	a	a	MD
104	14,5	18	<u>27-D Abrantes</u>	a	a	ME
111	27	20	<u>27-D Abrantes</u>	Q	a	MD

Foram realizados perfis geológicos ao longo da área de estudo, e que servirão de suporte para a construção do modelo geométrico tridimensional do sistema aquífero.

A Figura 4.4 apresenta a localização dos perfis geológicos executados, sobre carta geológica adaptada de Almeida *et al.*, (2000).

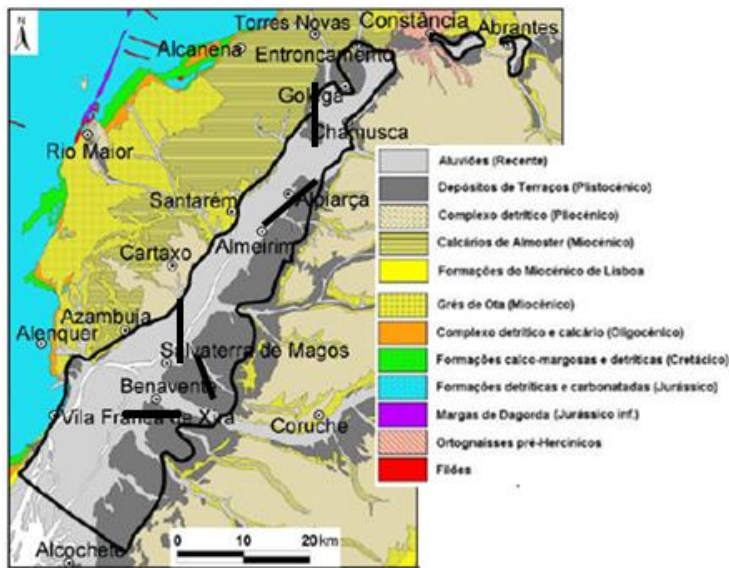


Figura 4.4 - Representação dos perfis geológicos sobre informação da carta geológica adaptada de Almeida *et al.*, (2000).

A área de estudo inclui 11 perfis nos três setores jusante, centro e montante: três perfis a jusante na margem esquerda; um perfil da zona central na margem direita para montante na margem esquerda; e outros cinco perfis no setor montante (perfis 6 a 9).

As sondagens do setor jusante na margem esquerda estão localizadas entre Salvaterra de Magos e Benavente, Folha 31-C (Coruche). A área inclui importantes afluentes da margem esquerda do rio Tejo, como a Ribeira de Muge e o rio Sorraia.

A geologia dominante na região é marcada pela presença das areias superficiais de vales e de terraços (Terraços arenosos - A1) que formam uma extensa e espessa cobertura sobre os baixos terraços (Tirreniano II) e parte dos terraços médios (Tirreniano I) (Zbyszewski & Veiga Ferreira, 1968).

Na Figura 4.5 apresenta-se os perfis geológicos do setor jusante (32-30), (243-244), (39-37) e (36-245).

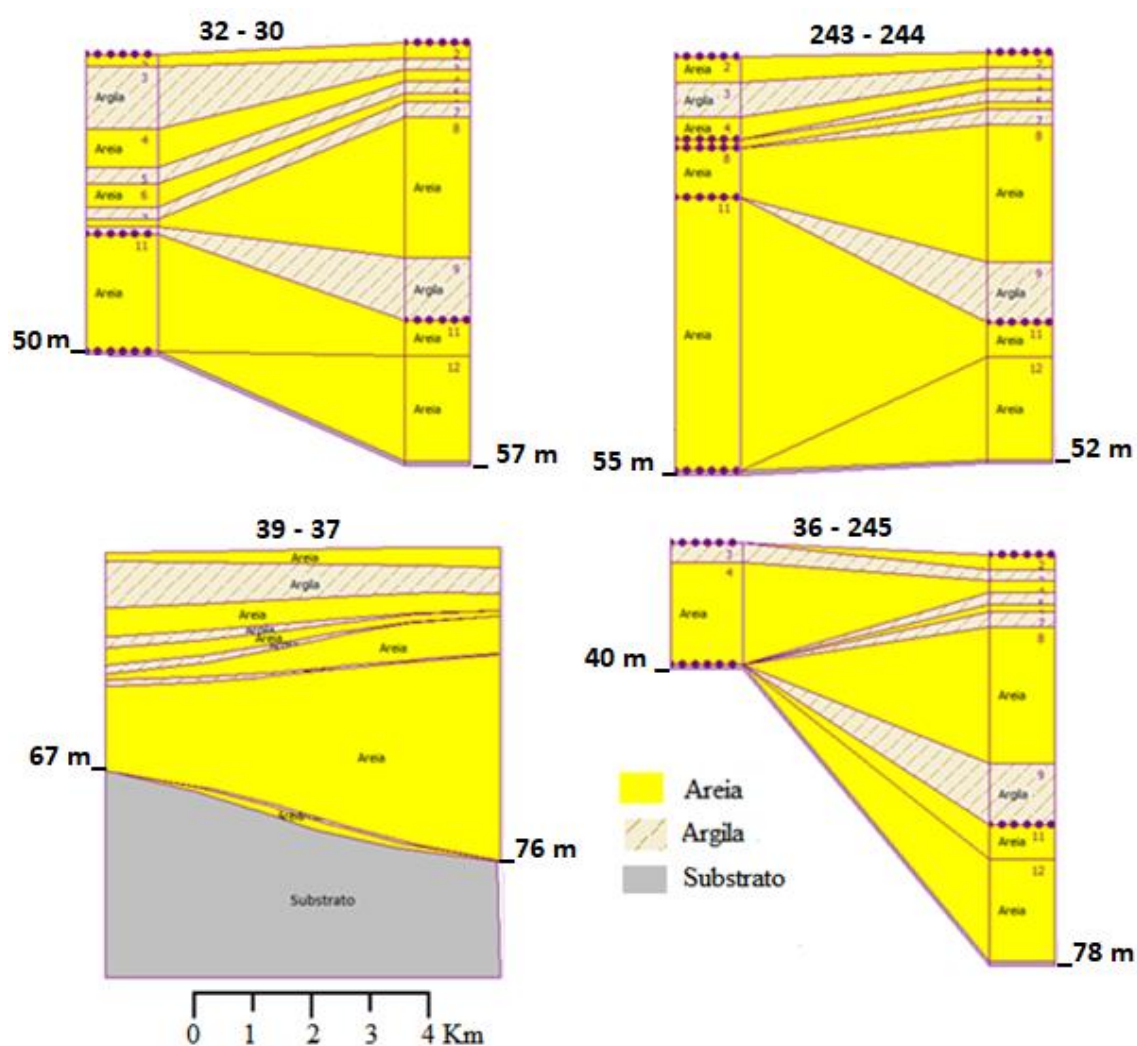


Figura 4.5 - Perfis litológicos do setor jusante na margem esquerda (JE). Esquema com a representação dos perfis (32-30), (243-244), (39-37) e (36-245).

Na Figura 4.6 está o perfil (217-248). Estas sondagens estão localizadas na Folha 34-B Loures.

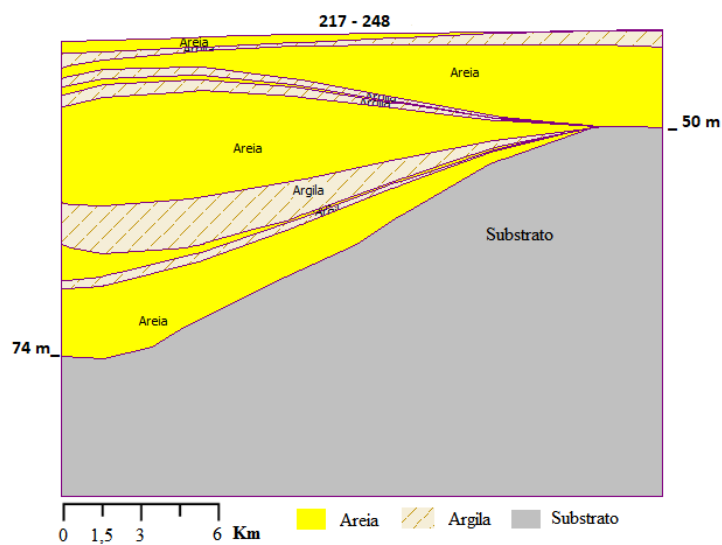


Figura 4.6 - Perfil litológico (217-248) no setor jusante do sistema aquífero.

Partindo de um ponto do setor central na margem direita do rio Tejo, foi realizado um perfil para montante na margem esquerda (Figura 4.7). A sondagem 25 na margem direita, situa-se na fronteira da área de estudo em afloramentos do Miocénico (indicado no perfil como substrato).

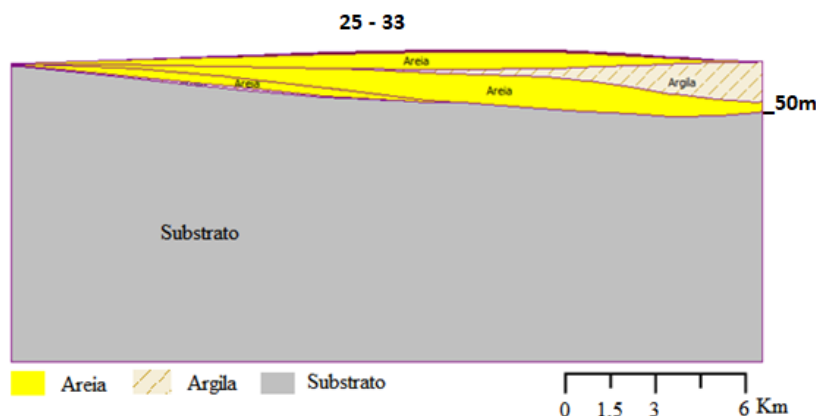


Figura 4.7 - Perfil litológico (25-33,) realizado no sistema aquífero.

No setor montante foram realizados cinco perfis que incluem os furos 87, 89, 91, 104 e 111. Os furos 87 e 91 utilizados na construção dos perfis 5, 6 e 8 encontram-se cartografados na Folha 27-C, Torres Novas.

O ponto de água 87 construído para captação e abastecimento público está localizado na Quinta da Broa, freguesia da Azinhaga, concelho da Golegã. Aqui a espessura do aquífero aluvionar foi avaliada em 20 m, sendo constituída essencialmente por cascalheiras.

O furo 91, construído no ano de 1958, está localizado em A Sul de Riachos, na freguesia da Golegã. A perfuração é de 22 m de profundidade atravessando areias médias a grosseiras com argila, seixos e calhaus, e ralos instalados entre os 10,5 e os 19,4 m.

A sondagem 89, localizada na região abrangida pela Carta Geológica de Santarém (Folha 31-A), corresponde à parte central do Ribatejo que inclui as zonas naturais da planície de inundação do rio Tejo, aluviões muito desenvolvidas, e os terraços da margem esquerda. Este furo localizado em Vale de Cavalos, no concelho da Chamusca, foi construído em 1996 para abastecimento público. Tem ralos instalados a partir dos 90 m de profundidade realizando assim, captações no sistema terciário. A profundidade das aluviões nesta zona ronda os 39 m.

O furo 104 (Folha 27-D, Abrantes) foi construído no ano de 1982 para extração e está localizado no Porto Carvão, freguesia da Chamusca, com a profundidade da base aluvionar atingindo os 14,5 m. Tem ralos instalados nas camadas de areia limpa entre os 11 m e 14 m.

O furo 111 localizado na freguesia da Golegã (Folha 27-D, Abrantes), construído para captação de água, tem uma profundidade de 27 m e ralos instalados entre os 16 e os 21 m nas camadas de areia com calhaus rolados.

A Figura 4.8 apresenta o esquema dos perfis realizados entre os furos descritos acima, sendo possível constatar uma menor profundidade do sistema a montante, quando comparado com os perfis realizados a jusante na área de estudo.

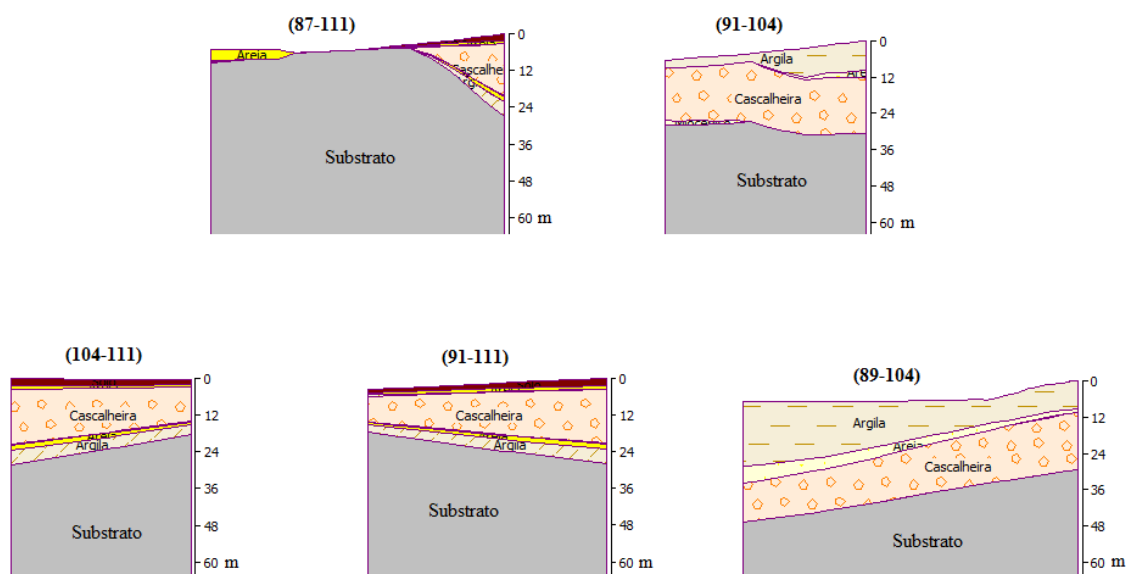


Figura 4.8 - Perfis litológicos realizados no sistema aquífero: perfil 5 (87-111, MD); perfil 6 (91-104, MD-ME); perfil 7 (104-111, ME-MD); perfil 8 (91-111, MD); perfil 9 (89-104, ME).

4.4. ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO AQUÍFERO

Através das ferramentas de modelação geoestatística é possível descrever o comportamento espacial e a distribuição dos valores, e subjetivamente, quantificar a incerteza associada à estimativa.

Deste modo, utilizando o *Geostatistical Analyst Wizard* do *ArcMap 10.6* em *Geostatistical Methods* selecionando *Kriging/Cokriging* do tipo *Ordinary* definiu-se o modelo de variograma para a estimativa da profundidade do aquífero. Após algumas tentativas e ajustamentos conforme a tabela abaixo (Tabela 2), selecionou-se o ajuste que melhor se enquadra às condições do fenómeno em questão.

Tabela 2 - Algumas definições no ajustamento do modelo teórico na estimação da profundidade da base do sistema aquífero por *kriging* e respetivos erros estatísticos. Legenda da tabela: Max nº V (número máximo de vizinhos); Min nº V (número mínimo de vizinhos); RMSE (raiz do erro quadrático médio).

Tipo Modelo	de	Efeito Pepita	Patamar	Max nº V	Min nº V	Tipo setor	Semi-eixo	Erro médio	RMSE
Estável (W=2)		26,9172	863,6422	5	2	Círculo 1 setor	25439,7	-0,006	8,6815
Gaussiano		25,0067	759,7347	15	2	Círculo 4 setores	20000	0,0127	8,3735
Esférico		0	830,14	10	2	Círculo 4 setores (45°)	30000	0,001	7,9292
Esférico		0	830,605	15	2	Círculo 8 setores	30027	0,002	7,9335
Estável (W=1,575)		21,0046	1464,702	5	2	Círculo 1 setor	50000	0,07	8,14

Nestas condições o modelo do variograma que melhor se ajusta e que melhor define o fenómeno é dado pela equação 4.1:

$$Modelo = 830,14 * Esférico(30000) \quad (4.1)$$

O resultado é um mapa com estimativa da profundidade da base do aquífero e um mapa da previsão de erros (Figura 4.9). Verifica-se, no primeiro mapa, valores mais baixos no setor centro para montante, e valores mais elevados a jusante, estando estas aproximações coerentes com os valores obtidos na revisão da literatura. Manuppella *et al.*, 2011, refere que os depósitos aluvionares alcançam os 80 m na zona Este da Folha 34-B.

O segundo mapa que se refere aos erros verificados na estimação. Apresenta-se razoavelmente satisfatório, com os mais baixos valores relacionados aos pontos amostrados, e os maiores erros relacionados com a falta de amostras ou com a maior distância aos pontos amostrados. A extremidade sul da área de estudo, poderá estar a sobrestimar valores para a profundidade da base do aquífero.

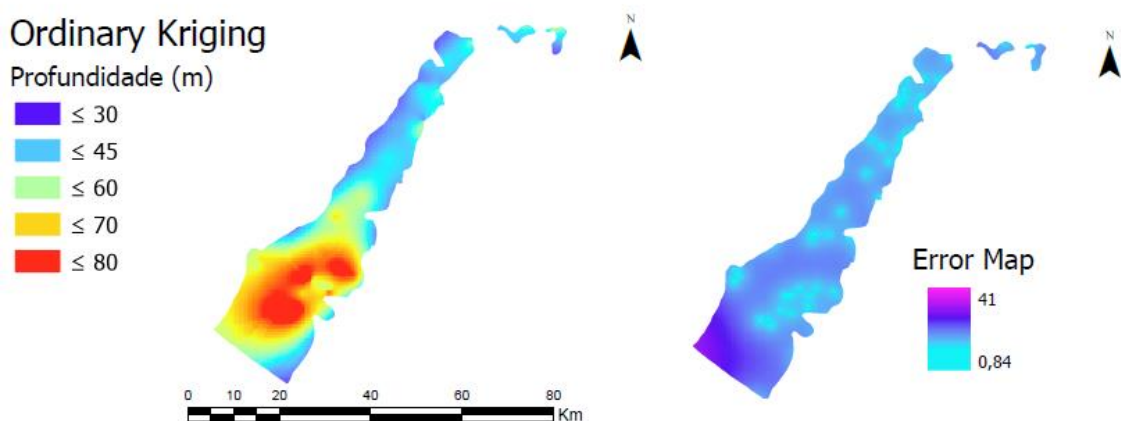


Figura 4.9 - Estimativa da profundidade¹⁴ da base do sistema aquífero utilizando o algoritmo *Ordinary Kriging* e respetivo mapa de previsão dos erros.

4.5. DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA PRODUTIVA

Pelo estudo dos *logs* de sondagens e a construção dos perfis geológicos, foi possível o reconhecimento das unidades estratigráficas e o diagnóstico dos níveis produtivos e confinantes que constituem o sistema aquífero.

A quantificação dos níveis pouco permeáveis (aquitardo) baseou-se na contagem e no agrupamento das camadas dos lodos, das argilas e das areias muito argilosas. Já as camadas de areias de granulometria média a grosseira, com presença ou não de seixos e calhaus e as cascalheiras, foram contabilizadas na determinação dos níveis produtivos.

¹⁴ <https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/AquiferDepth.zip> (raster file download available here)

Analisando os 60 logs de sondagens inventariados neste trabalho, foi possível o cálculo da espessura relativa do aquífero e do aquitardo em cada uma das sondagens (Figura 4.10).

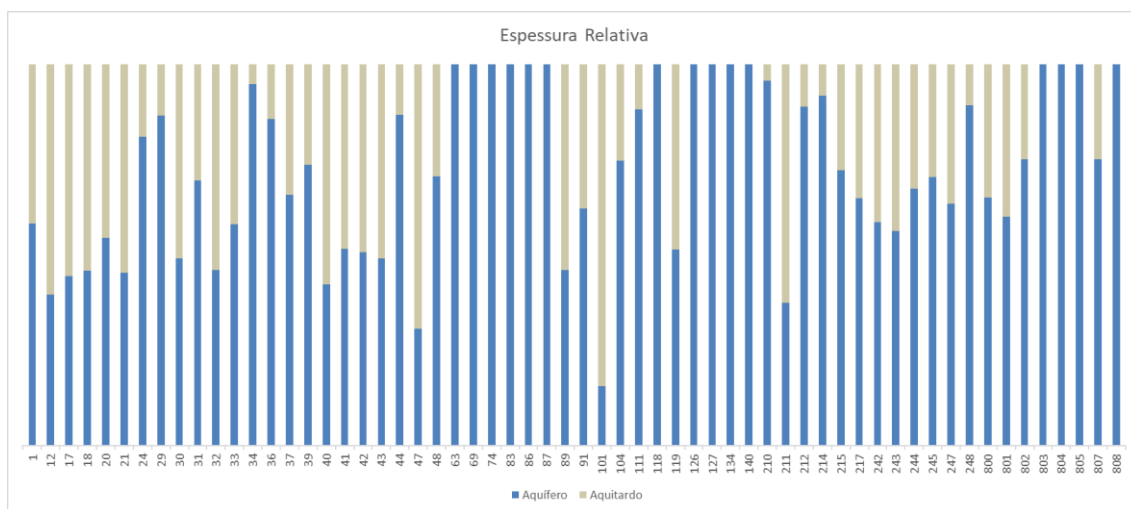


Figura 4.10 - Representação esquemática da espessura relativa do aquífero versus aquitardo nos 60 logs de sondagens analisados.

A análise estatística da espessura produtiva é apresentada na Figura 4.11, em que é possível concluir que 50% das amostras (sondagens) tem espessura produtiva inferior a 25 m, e que 15 dos 60 logs de sondagem estudados têm espessura produtiva superior a 35,5 m.

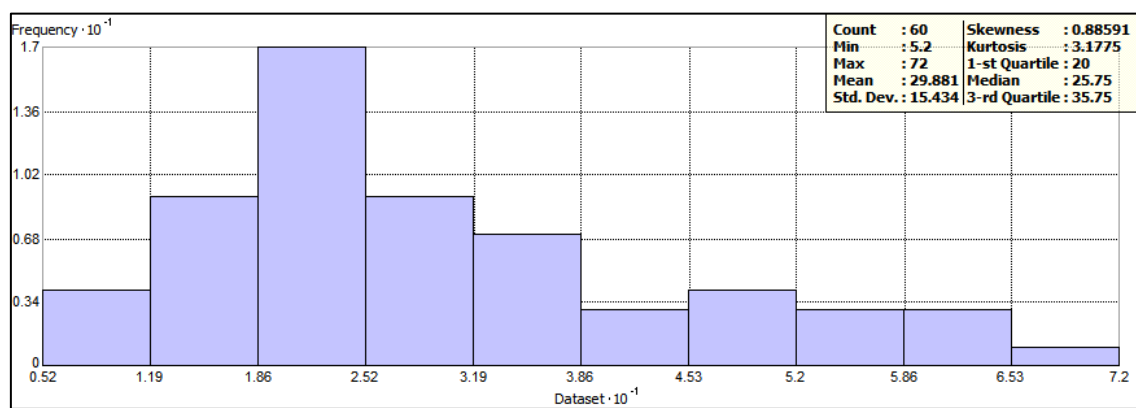


Figura 4.11 - Histograma e análise estatística da espessura produtiva do sistema aquífero das Aluviões do Tejo.

A identificação dos níveis produtivos e a sua distribuição espacial será útil na compreensão do comportamento do fluxo e no cálculo da condutividade hidráulica. Neste sentido, procedeu-se à modelação geostatística utilizando a mesma metodologia daquela utilizada para a estimativa da profundidade. O mapa resultante é apresentado na Figura 4.12.

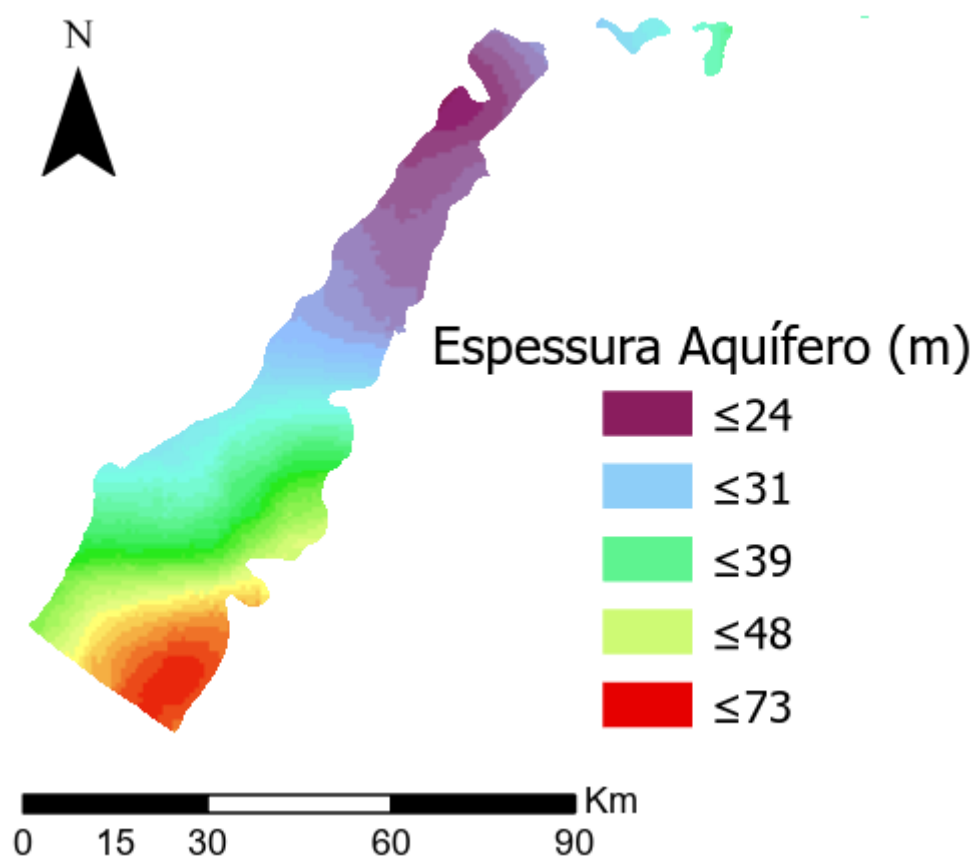


Figura 4.12 - Mapa com estimativa da espessura¹⁵ produtiva do sistema aquífero Aluviões do Tejo, estimado por *Ordinary Kriging*.

Os valores mínimos observados para a espessura produtiva distribuem-se na área de estudo a partir do setor central a montante, coincidindo com os menores valores para a profundidade da base do aquífero. Nesta área, o Quaternário está representado por alguns níveis de terraços exclusivamente de origem fluvial que alcançam os 15 m de espessura (Manuppella *et al.*, 2006). Constituem os níveis de depósitos de terraços mais baixos dos vales do Almonda, do Alviela, da Ribeira de Centeio e dos vários afluentes destas linhas de água e ainda das grandes manchas de Azinhaga e Pombalinho, sendo todos, reconhecidos leitos de cheia do rio Tejo.

As maiores espessuras produtivas situam-se no setor jusante, junto à margem esquerda do rio Tejo onde também se verifica a predominância de valores mais profundos para a base do aquífero. Este setor é representado por afloramentos arenosos atuais (Holocénico) resultante da lavagem dos depósitos de terraços (Plistocénico) que aparecem sotopostos àqueles.

A área centro-jusante é um domínio espacial com grande espessura de sedimentos em relação ao setor montante, com a circulação da água a depender do potencial hidráulico local e da disponibilidade hídrica.

¹⁵ <https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/AquiferThickness.zip> (raster file download available here)

4.6. REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO SISTEMA AQUÍFERO

À luz dos princípios da sedimentologia e estratigrafia, e tendo como pressupostos o modelo teórico do mecanismo de formação dos terraços fluviais (Zbyszewsky, 1946; Mendonça, 1990), o modelo hidrogeológico proposto para a Bacia do Tejo-Sado (Mendonça, 2010) e os perfis geológicos construídos neste trabalho, apresenta-se na Figura 4.13 o modelo geométrico proposto para o setor centro-jusante do sistema aquífero Aluviões do Tejo.

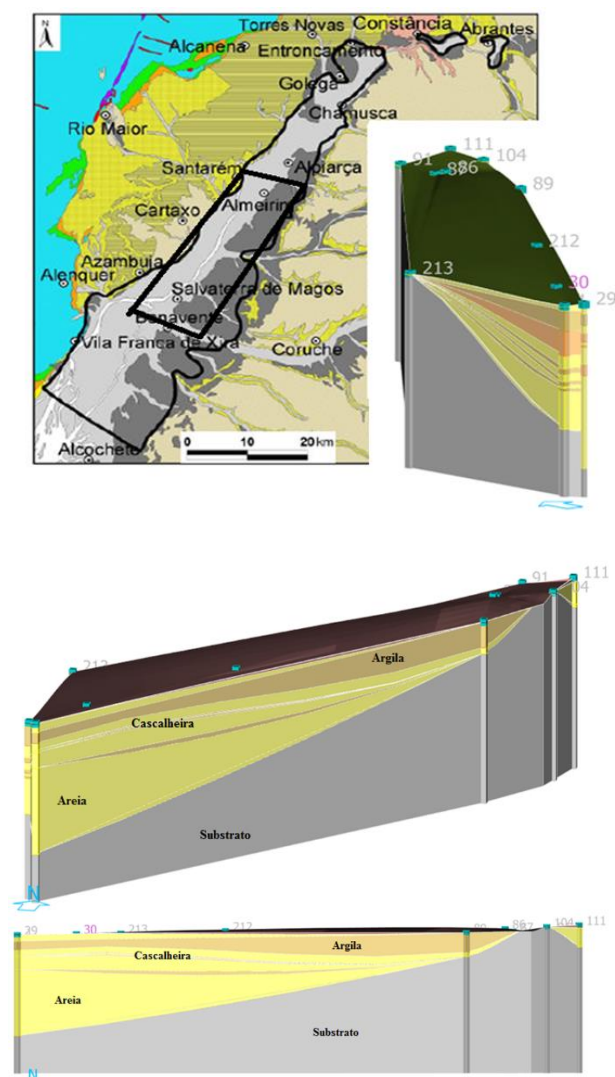


Figura 4.13 – Enquadramento geológico e modelo geométrico tridimensional do sistema aquífero Aluviões do Tejo.

A montante na margem esquerda, observa-se uma maior espessura do aquífero e a sua progressiva diminuição para jusante.

Nota-se um nível de cascalheira muito bem definido aos 40 metros de profundidade, traçado a partir dos registos a montante, nomeadamente, os níveis verificados nos furos 87 e 89, em que

apresentam, respetivamente, 20 e 13 metros de espessura de cascalheiras que marcam o fim do ciclo de regressão marinha.

É perceptível o aumento da profundidade da base do aquífero de montante para jusante, como referenciado por alguns autores. De todo modo, esta profundidade não é simétrica nas duas margens do rio, como o modelo sugere. Numa visualização tridimensional, apresenta-se o mapa com a estimativa da profundidade da base do aquífero utilizando a ferramenta *ArcScene*® do *ArcGis 10.6*® (Figura 4.14).

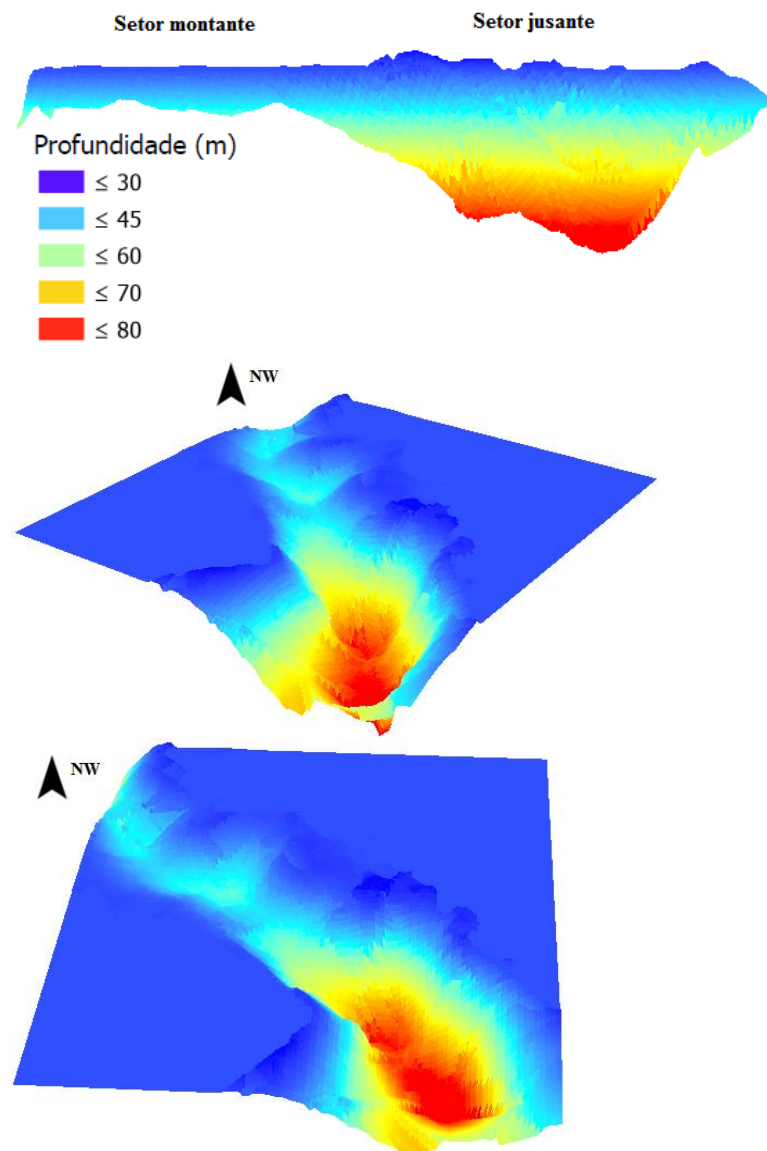


Figura 4.14 - Representação 3D da profundidade do aquífero estimado por *Ordinary Kriging*.

5. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO SISTEMA AQUÍFERO

5.1. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE BOMBEAMENTO

Os ensaios de bombeamento, de forma geral, têm como objetivos, determinar os parâmetros hidráulicos do aquífero, definir o regime de exploração, quantificar o rendimento da captação, avaliando se o aquífero é capaz de ceder água em quantidades economicamente viáveis, e ainda, testar o estado de construção da captação.

Como procedimento inicial, mede-se o nível hidrostático do furo (NHE) e inicia-se a bombagem durante um certo tempo, com um determinado caudal. Os rebaixamentos podem ser medidos no próprio furo ou num furo de observação localizado nas proximidades. Os parâmetros hidráulicos são, então, determinados a partir do caudal bombeado, dos rebaixamentos medidos e das respetivas distâncias através de métodos apropriados.

A informação disponível nas bases de dados consultadas referente aos ensaios de bombeamento limita-se à designação do tipo de ensaio realizado, aos valores do caudal e aos níveis hidrostático e hidrodinâmico. Estes dados permitiram calcular diretamente valores para o rebaixamento e para o caudal específico.

Os tipos de ensaios de bombeamento realizados foram os de caudal variável, caudal variável com recuperação, caudal constante e constante com recuperação. Tendo sido executados entre os anos de 1954 a 2005 e abrangendo os concelhos de Abrantes (20 de um total de 60 ensaios), Chamusca (9), Golegã (7), Vila Franca de Xira (7), Alenquer (6), Entroncamento (4), Torres Novas (3), Constância (2) e Almeirim (2).

A Figura 5.1 apresenta o número de furos construídos com execução de ensaios de bombagem por concelho, no intervalo de 50 anos (1954- 2005) para o total de 60 dados de ensaios inventariados. Entre os anos de 1954 a 1965, verificou-se um maior número de ensaios realizados no concelho de Abrantes. Especula-se que a execução destes ensaios esteja relacionada com a monitorização da barragem de Castelo de Bode, construída em meados da década de 1940.

A interpretação destes ensaios possibilitará a obtenção de valores para o rebaixamento, o caudal específico, transmissividade Logan e para a estimativa da condutividade hidráulica.

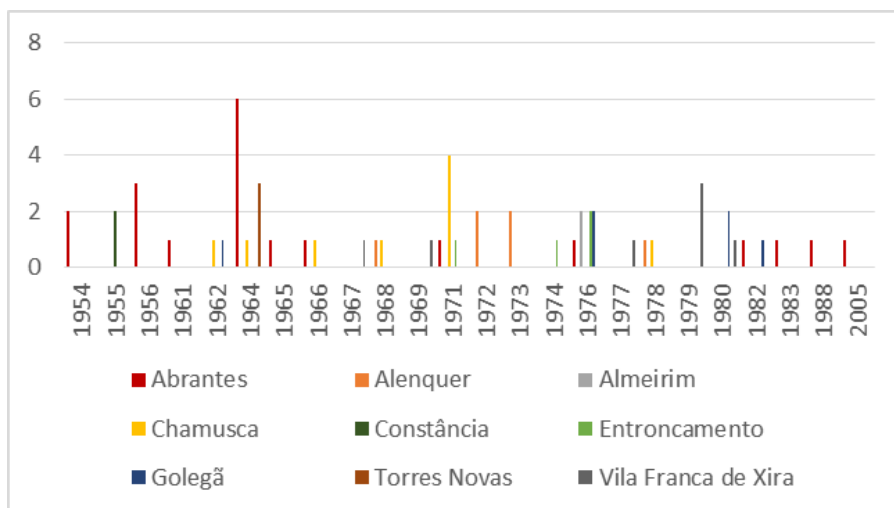


Figura 5.1 - Número de ensaios de bombeamento realizados por concelho entre os anos de 1954 e 2005.

5.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA PRODUTIVIDADE

A Figura 5.2 faz referência à análise estatística do caudal de bombagem e do rebaixamento, obtidos a partir dos relatórios de sondagens hidrogeológicas (LNEG, 2019). O respetivo histograma e valores para a média aritmética, o desvio padrão, valores mínimos e máximos, mediana, coeficiente de Skewness, curtose e quartis, são abaixo, apresentados.

Começando por testar a normalidade do conjunto de dados de caudal, comparando as medidas de localização (média e mediana) e as medidas de forma (coeficiente de Skewness e curtose), conclui-se que a distribuição é ligeiramente assimétrica à direita.

O desvio padrão como forma de aferir o grau de dispersão dos valores em torno da média, permite levantar hipóteses sobre a variabilidade dos dados. O coeficiente de variação obtido pela divisão entre o desvio padrão e a média (em percentagem, 64,42 %) fornece indicações da homogeneidade do conjunto de dados, e quanto menor este valor menor a variabilidade.

Analizando os valores, mínimo e máximo, o desvio padrão e o coeficiente de variação, constata-se alguma tendência à heterogeneidade das amostras de caudal. Tal variabilidade era de algum modo esperada, uma vez que este atributo pode ser influenciado por fatores ligados à construção do furo, às características do aquífero, ao tipo de ensaio que se realiza, ao tempo de bombagem decorrido até ao momento da medição, além de ser um valor estipulado de acordo com o objetivo de cada ensaio.

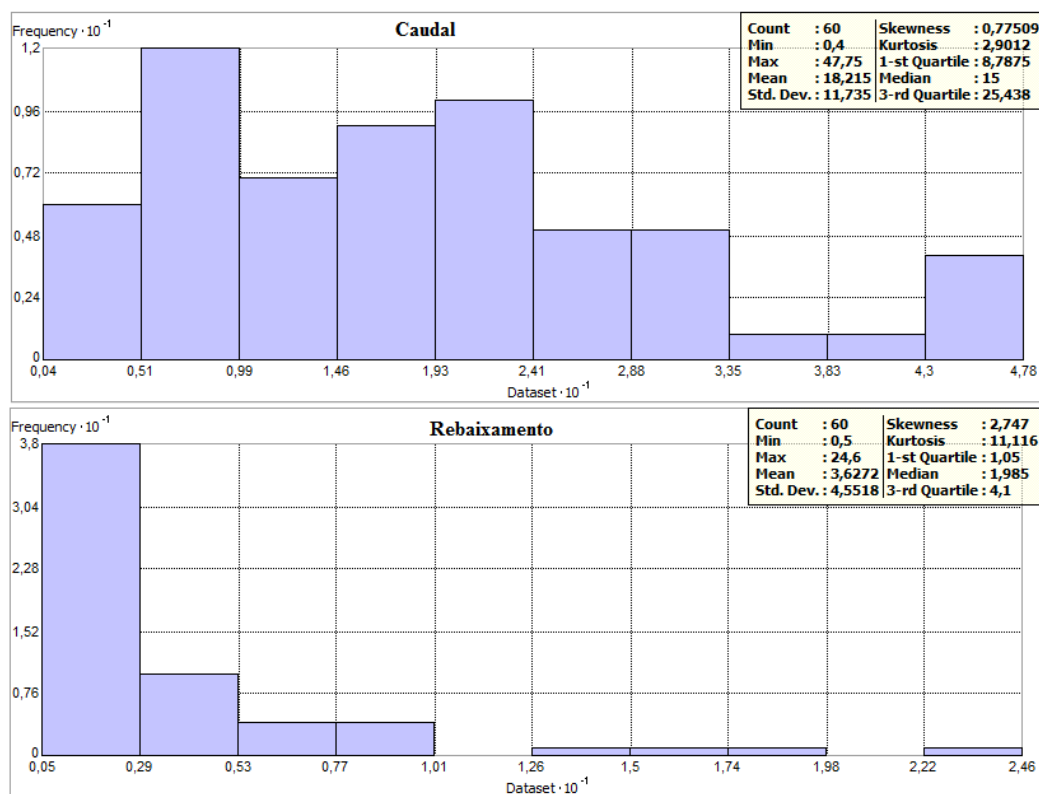


Figura 5.2 - Histograma e análise estatística dos valores de caudal de bombagem (L/s/m) e de rebaixamento (m), obtidos a partir dos ensaios de bombeamento (LNEG, 2019).

Almeida *et al.* (2000) apontam valores médios para a produtividade na ordem dos 19,9 L/s/m para as aluviões e 12,6 L/s/m para os terraços. Estes valores, não estão muito distantes dos obtidos neste estudo 17,74 L/s/m, em que se considerou o sistema aluvionar como um todo, uma vez que não se tem amostras suficientes para a separação entre aluviões e terraços.

O valor da mediana dá indicações de que 50% das amostras apresentam valores iguais ou inferiores a 15 L/s/m, e em 75% dos furos (um total de 45) o valor para o caudal de bombeamento foi inferior a 25,5 L/s/m.

Assim como o caudal, o rebaixamento também pode ser influenciado por fatores relacionados aos objetivos do ensaio de bombeamento. A análise estatística do rebaixamento indica que apenas ¼ das amostras (15 dos 60 ensaios avaliados) apresentam rebaixamentos superiores a 4,1 m, e 50% das observações têm rebaixamentos inferiores a 2 m.

Os mais baixos valores permitem concluir que, nestas áreas, o aquífero está a fornecer água em quantidades consideráveis, sendo assim, é possível prever elevados valores para o coeficiente de armazenamento ou porosidade eficaz devido à alta disponibilidade de recurso hídrico.

A Figura 5.3 apresenta a localização geográfica de amostragem e a distribuição dos valores (Thiessen Polygons). Os 60 registos foram agrupados em 5 classes, de acordo com o método *Natural Breaks Classification (Jenks)*. A análise combinada dos mapas de caudal e rebaixamento permite notar que, em alguns dos ensaios, a consideração de um valor de caudal de bombagem elevado está associada aos valores médios-altos de rebaixamento.

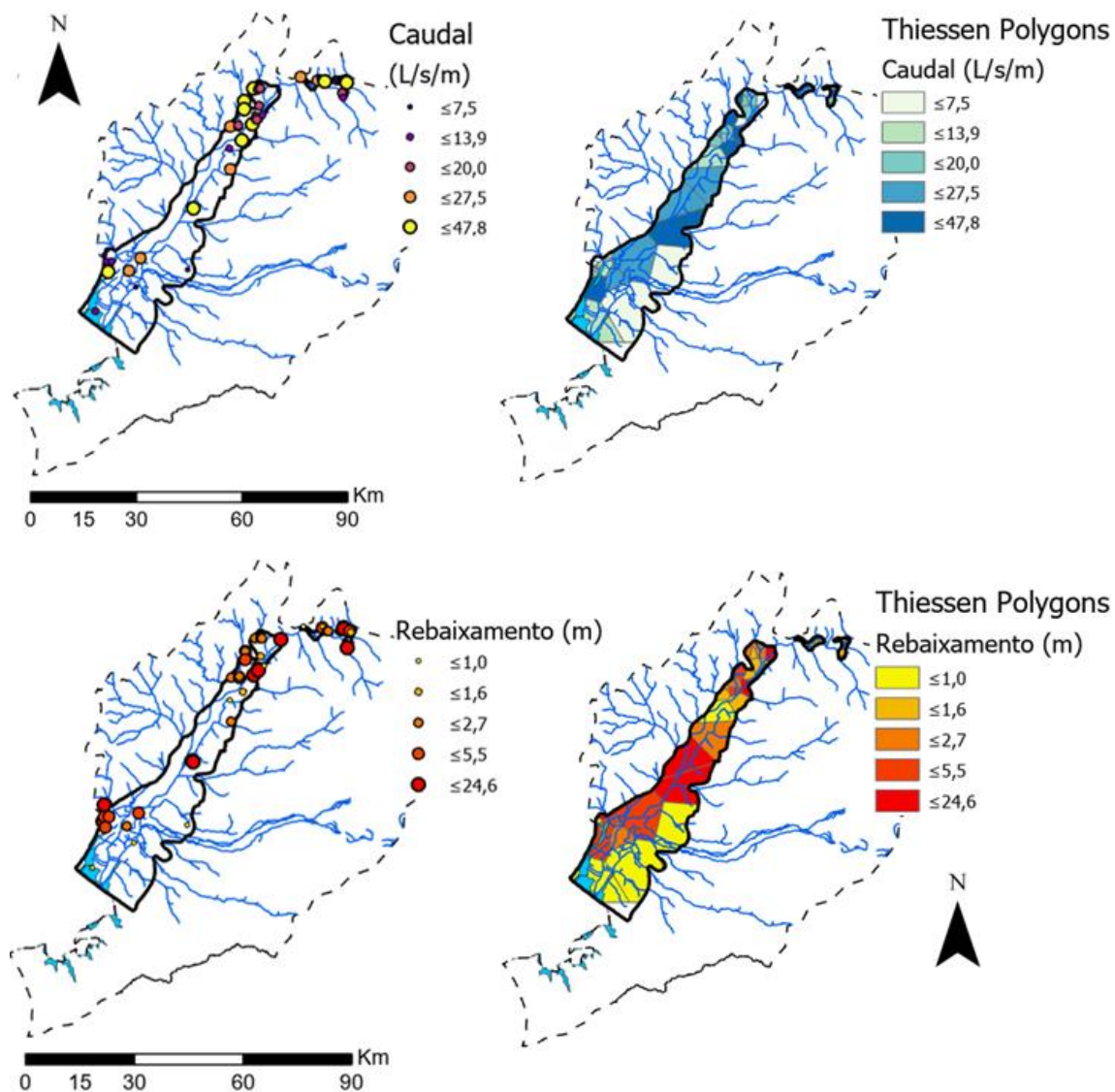


Figura 5.3 - Localização dos ensaios de bombagem e distribuição espacial dos valores de caudal ensaiado e rebaixamento registado, retirados dos relatórios de ensaio de bombeamento (LNEG, 2019), e o seu enquadramento na rede de drenagem da Bacia do Baixo Tejo.

Neste tipo de ensaios o rebaixamento pode ser minimizado se os poços em bombeamento estiverem situados paralelamente, o mais próximo possível de fronteiras de recarga, e perpendicularmente, tão longe quanto possível, de fronteiras impermeáveis. A característica principal de uma fronteira de recarga é a de que os rebaixamentos no aquífero não produzam rebaixamentos através da fronteira.

A partir dos valores do caudal de bombagem e do rebaixamento determinou-se o caudal específico. E aplicando operações de interpolação espacial (método de triangulação - Polígonos de Thiessen¹⁶) obteve-se o mapa da distribuição espacial dos valores do caudal específico, que é apresentado no mapa seguinte (Figura 5.4). O mapa mostra a representação da área de influência

¹⁶ <https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/FlowRateThiessenPolygons.zip>
<https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/DrawdownThiessenPolygons.zip>
<https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/SpecificFlowRateThiessenPolygons.zip>
(output files available here to download)

enquadrada com a rede de drenagem da Bacia do Baixo Tejo, no sentido de se ter uma percepção de como as linhas de água poderão estar a influenciar os valores.

A falta de amostras no setor central dificulta a sua interpretação, bem como a concentração das amostras no setor montante. De todo modo, os valores mais altos para o caudal específico são observados nos terrenos a montante, e os valores medianos são observados a jusante.

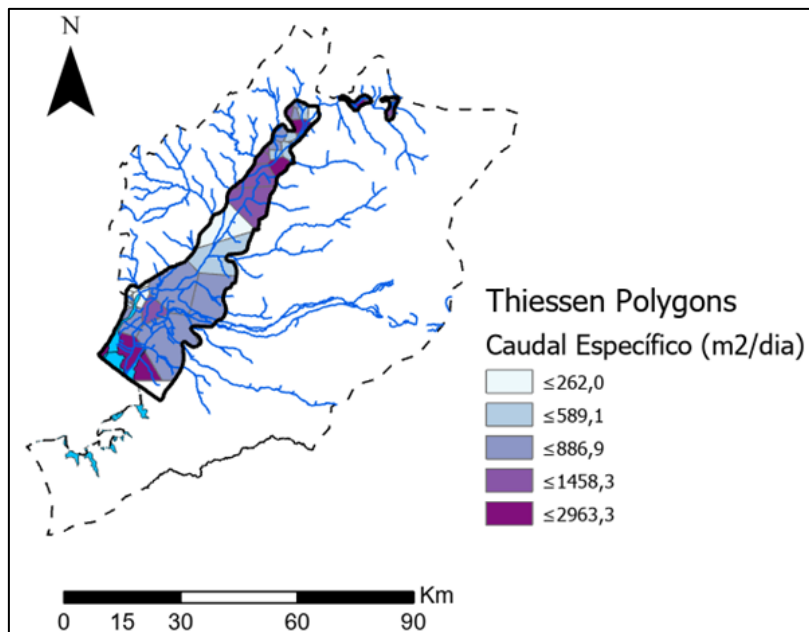


Figura 5.4 - Polígonos de Thiessen - Área de influência dos registos de caudal específico (m^2/dia), sobre a rede de drenagem da Bacia do Baixo Tejo.

5.3. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS

A informação contida nos relatórios dos ensaios de bombeamento insere-se no contexto da produtividade. O objetivo desta modalidade de ensaios é quantificar o rendimento da captação avaliando se o aquífero é capaz de ceder água em quantidades economicamente viáveis. Os parâmetros hidráulicos fundamentais de um aquífero são designados de acordo com a sua função:

- Caudal e velocidade - caudal e a velocidade efetiva de circulação;
- Capacitiva - designado pela porosidade, a porosidade eficaz e o coeficiente de armazenamento;
- Transmissiva - pela condutividade hidráulica e transmissividade;
- Piezometria e gradiente - nível piezométrico e gradiente hidráulico.

Uma vez calculado o caudal específico (razão obtida pelo caudal de bombagem e o rebaixamento), aplicando o método desenvolvido por Logan (1964), é possível obter uma avaliação expedita da transmissividade em aquíferos porosos, quer confinados ou livres, através da seguinte equação (5.1):

$$T_{Logan} = \frac{q}{sp} \cdot 1,22 \quad (5.1)$$

Em que T é a transmissividade Logan (m^2/dia), q o caudal de bombagem (L/s) e sp o rebaixamento (m).

A Figura 5.5 apresenta o mapa de estimativa da transmissividade Logan, obtido pelo método geoestatístico *Ordinary Kriging*. O mapa está dividido em 5 classes com valores máximo e mínimo, iguais a 786 m^2/dia e 3.313 m^2/dia , respetivamente. Almeida *et al.* (2000) indica valores para a transmissividade que variam entre 6 m^2/dia e 5.792 m^2/dia . O autor considera que a grande variabilidade dos valores, pode ser explicada pela heterogeneidade dos sedimentos e pela complexidade na estratificação, e salienta que as captações implantadas nas aluviões são mais produtivas que as dos terraços.

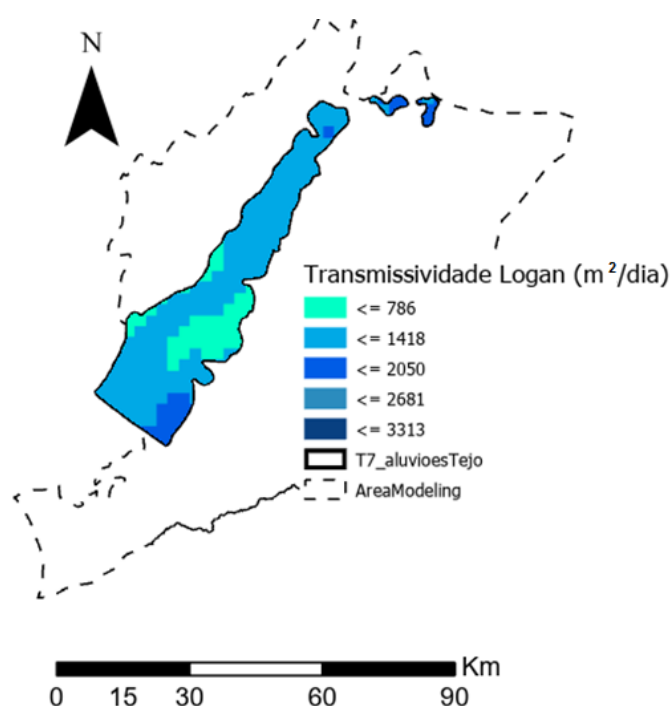


Figura 5.5 - Mapa de estimativa da transmissividade Logan obtido pelo método geoestatístico *Ordinary Kriging*¹⁷.

Verifica-se a tendência no aumento dos valores das áreas laterais para a parte central do aquífero, estando os valores mais baixos associados ao setor jusante. Há uma homogeneização dos valores a partir do centro do polígono, coincidindo com o curso do rio principal (rio Tejo) e com a distribuição espacial das aluviões.

Várias metodologias são apresentadas na literatura para previsão da condutividade hidráulica e compreender o processo de circulação da água no sistema aquífero aluvionar. Almeida *et al.* (2000) apresenta valores para este parâmetro iguais a 140 m/dia para os terraços e 136 m/dia para as aluviões. A plataforma do SNIRH disponibiliza a ficha do aquífero a qual, aponta para a condutividade hidráulica, valores médios de 127 m/dia nos depósitos de terraços e 122 m/dia nas aluviões.

¹⁷ <https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/LoganTrasmissivity500.zip> (output raster file available to download)

Estes valores mostram-se enquadrados na classe de permeabilidade das areias/cascalheiras, de acordo com os limites de permeabilidade propostos por Custodio & Llamas (1996) e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de permeabilidade de algumas rochas sedimentares. Tabela adaptada de Custodio & Llamas (1996).

Material Geológico	Permeabilidade (m/dia)
Cascalheira	$10^2 - 10^4$
Areia	$1 - 10^2$
Silte	$10^{-4} - 1$
Argila	$10^{-6} - 10^{-4}$

Uma vez que este parâmetro se relaciona com outras propriedades físicas, como a porosidade eficaz, o conteúdo argiloso e a direção de escoamento, a permeabilidade pode ser estimada empiricamente, recorrendo às mesmas.

A porosidade total (φ) pode ser primária (formada durante a deposição dos sedimentos) ou secundária (desenvolvida depois dos fenómenos de deposição, compactação e cimentação), relacionando-se com o volume total dos vazios e o volume total da rocha, de acordo com a fórmula (5.2).

$$\varphi (\%) = \frac{\text{Volume total dos vazios}}{\text{Volume total da rocha}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Já a porosidade eficaz (φ_e) ou cedência específica, tem em conta o volume da água gravítica ou livre (disponível para escoamento) e o volume total da rocha dado pela fórmula (5.3):

$$\varphi_e (\%) = \frac{\text{Volume da água gravítica}}{\text{Volume total da rocha}} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Este parâmetro controla a circulação de fluídos numa rocha saturada e depende da distribuição, do tamanho, forma, arranjo e homogeneidade das partículas do material.

A Tabela 4 adaptada de Chappelier (1992) apresenta valores indicativos da porosidade total e efetiva de algumas rochas/materiais sedimentares.

Tabela 4 - Porosidades médias de algumas rochas/materiais sedimentares (Chappelier, 1992).

Material Geológico	φ (%)	φ_e (%)
Cascalheira	45	40
Areia	40	30
Areia Siltosa	32	5
Silte	36	3
Argila	47	0
Grés	30	2-5

Arenito fissurado	20	2-15
-------------------	----	------

Analisando estes valores, conclui-se o porquê das areias, cascalheiras não consolidadas e arenitos (materiais com porosidade primária e permeabilidade elevadas) constituírem importantes reservatórios de água.

Como já demonstrado, a interpolação espacial gera modelos que permitem estimar valores de uma superfície em pontos não amostrados com base nos valores observados numa dada vizinhança. Com estas considerações, estimam-se valores para a condutividade hidráulica (k), a partir da transmissividade Logan (T_L) e da espessura produtiva do aquífero (b), de acordo com a equação (5.4):

$$k = \frac{T_{Logan}}{b} \quad (5.4)$$

No mapa apresentado na Figura 5.6 observa-se a distribuição espacial da condutividade hidráulica estimada pelo método geoestatístico *Ordinary Kriging*. Os valores mais baixos e medianos aparecem muitas vezes associados a regiões com maior espessura produtiva e maior profundidade (setor jusante). Os valores mais altos coincidem espacialmente com os depósitos do Holocénico, predominante no setor montante.

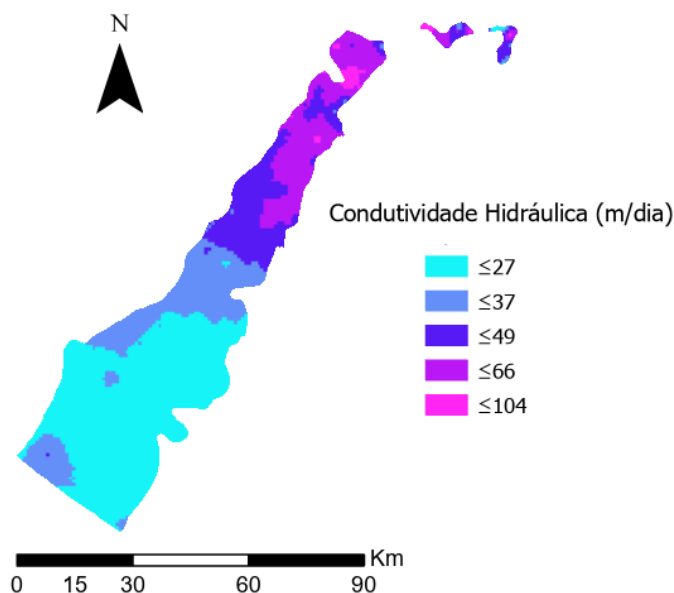


Figura 5.6 - Mapa de estimativa da condutividade hidráulica do aquífero obtido pelo método geoestatístico *Ordinary Kriging*¹⁸.

¹⁸ https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/Hyd_Conductivity.zip (output raster file available to download)

A Figura 5.7 apresenta a distribuição estatística dos valores de condutividade hidráulica estimados e respetivo histograma. Verifica-se que, em 25% das amostras (correspondente a 52 pontos de água) a condutividade hidráulica é maior do que 50 m/dia, podendo atingir um valor máximo de 107 m/dia. 50 % das observações não ultrapassam os 40 m/dia.

O valor médio estimado para a condutividade hidráulica a partir da transmissividade Logan e da espessura produtiva é de 39,75 m/dia com desvio-padrão igual 18,84 m/dia. Os valores obtidos poderão estar subestimados quando comparados com os valores de referência. De todo modo, os maiores valores localizam-se maioritariamente em afloramentos aluvionares (setor centro-montante).

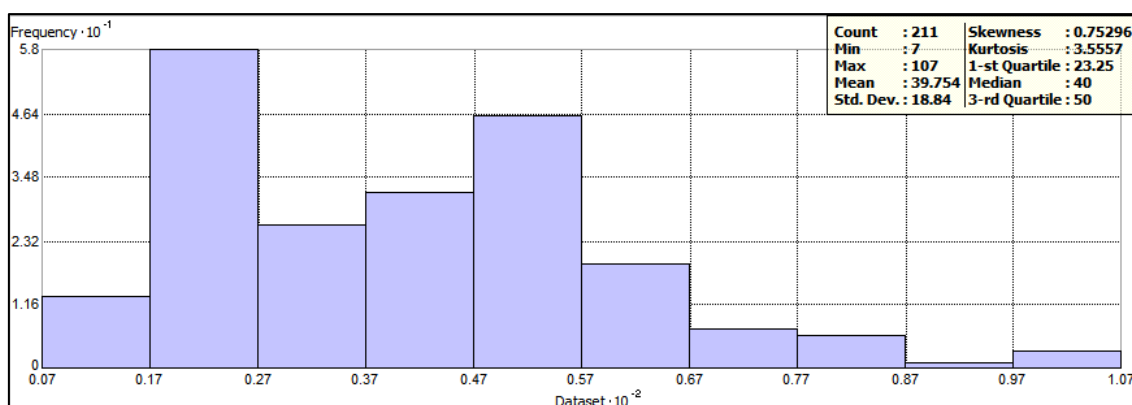


Figura 5.7 - Histograma e análise estatística dos valores estimados para a condutividade hidráulica (m/dia).

5.4. PIEZOMETRIA

O movimento da água nos aquíferos está dependente da existência de um gradiente de energia que varia de pontos com maior potencial para pontos de menor potencial. Este movimento dá-se numa velocidade tão pequena, que por esta razão, é frequentemente desprezada nos cálculos. Este movimento é descrito pela equação de Bernoulli (5.6):

$$\Delta H = H_A - H_B = \frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A - \frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \quad (5.6)$$

Sendo ΔH (m) a perda de carga entre A e B; u/γ_w a altura piezométrica em determinado ponto; e Z a cota do ponto com relação a um plano de referência.

O sistema aquífero Aluviões do Tejo contacta com os outros sistemas da Bacia do Tejo-Sado e com os cursos de água superficial, existindo uma completa interdependência entre eles.

A complexidade e heterogeneidade das formações geológicas que constituem o sistema aquífero influenciam fortemente o escoamento subterrâneo nas aluviões. A alternância de litologias

pouco permeáveis, por vezes, resulta numa compartimentação do aquífero caracterizado por mudanças repentinas no sentido de fluxo e nas variações piezométricas.

A rede de monitorização da quantidade (SNIRH) recolhe e publica dados referentes à superfície piezométrica e à profundidade do nível da água. O tratamento destes dados possibilita o conhecimento sobre o seu potencial hidráulico, auxilia na identificação dos sentidos de escoamento, determina a origem ou destino do poluente, além de dar indicações de como o aquífero está a ser afetado por uma captação.

O estudo do comportamento da água começou pela análise estatística descritiva da piezometria (Figura 5.8), na qual, se verifica que 25% das observações apresentam o nível freático muito próximo da superfície de referência, com valores inferiores a 1 m abaixo da superfície e 50% das observações apresentando valores inferiores aos 9,57 m.

A análise exploratória da profundidade do nível da água mostra que 75% das observações têm valores inferiores a 4,36 m, com um valor médio de 3,35 m e um valor máximo igual a 52,86 m.

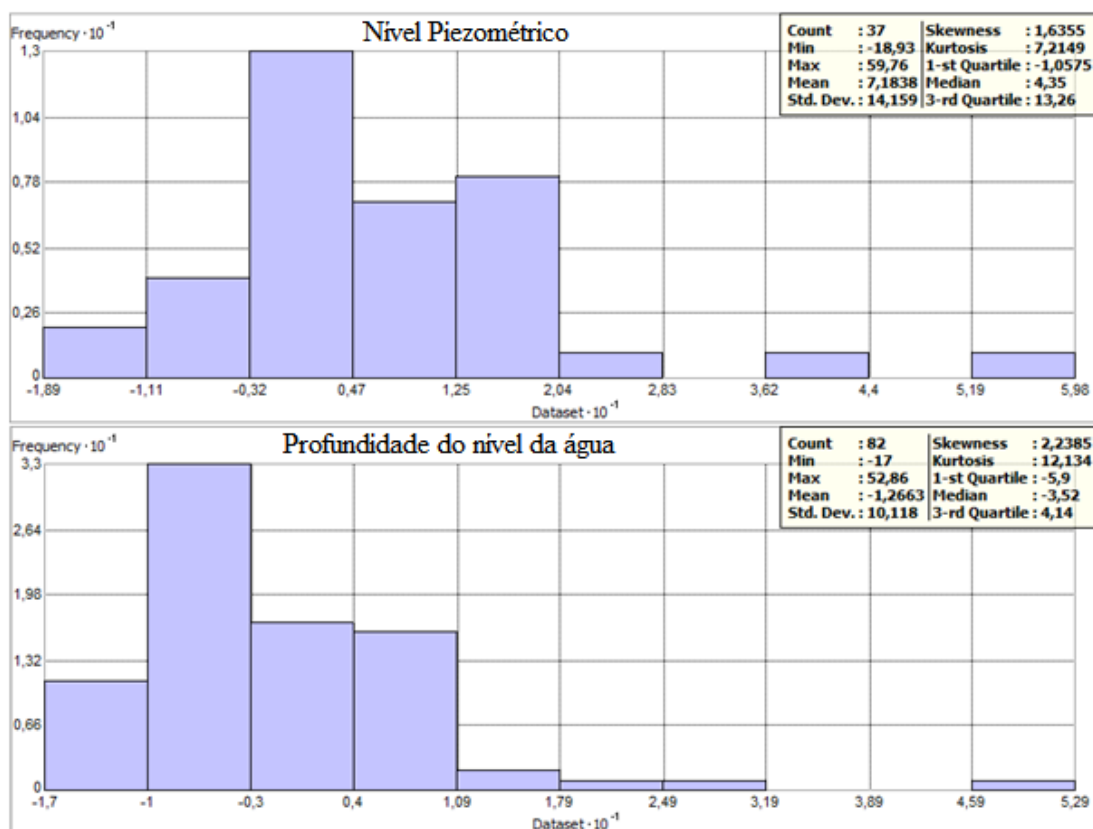


Figura 5.8 - Histograma e análise estatística dos valores do nível piezométrico (m) e da profundidade do nível da água (m), inventariados a partir da rede de monitorização da quantidade (SNIRH, 2019).

O mapa da figura 5.9 apresenta a interpolação pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW) para as amostras de piezometria e profundidade do nível da água.

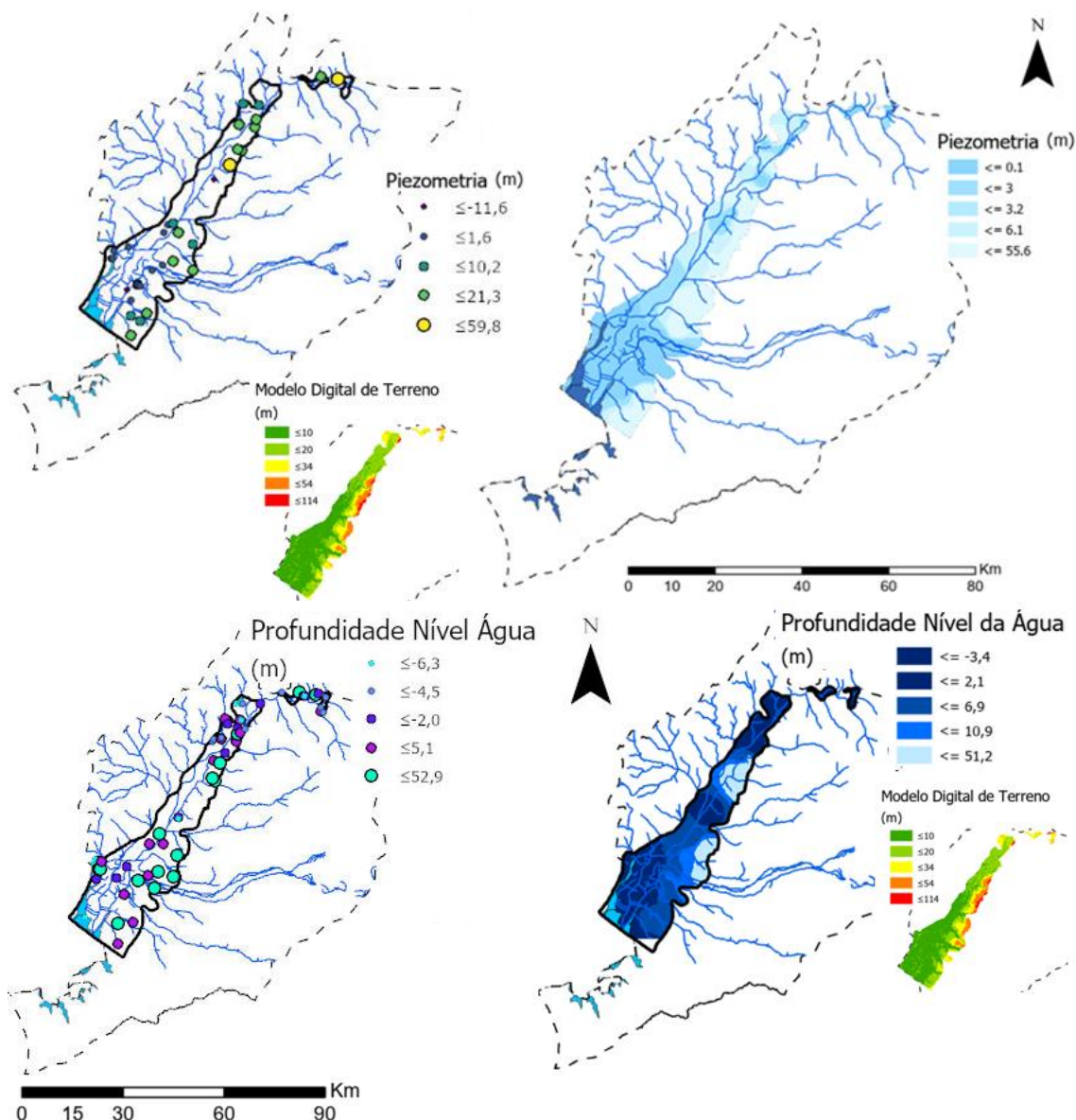


Figura 5.9 – Distribuição espacial das amostras, mapa de interpolação pelo método IDW e MDT. Piezometria e a profundidade do nível da água¹⁹.

O MDT é útil para a visualização de áreas onde a topografia é mais elevada e na validação dos valores extremos para a piezometria e a profundidade do nível da água.

Para a análise da evolução temporal do nível piezométrico e da profundidade do nível da água, extraiu-se da base de dados de monitorização do SNIRH, dados referentes ao período de 01/10/2015 a 30/09/2019 (anos hidrológicos de 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019), em onze pontos de água distribuídos por cinco concelhos do distrito de Santarém.

As condições atmosféricas que caracterizam a área de influência da zona de recarga do aquífero são determinantes no estudo da evolução temporal da piezometria. O clima que envolve a Bacia do Tejo é do tipo sul mediterrânico que, numa caracterização genérica, divide o ano em duas

¹⁹<https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/piezometry.zip>
<https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo/blob/master/WaterTable.zip>
(output raster files available here)

fases bem definidas quanto ao regime de chuvas, salvo influências atlânticas que mais comumente vem modificando esta regra.

A estação quente é marcada por um semestre seco de altas temperaturas e por baixos valores de precipitação. A estação fria é marcada por um semestre com elevada humidade do ar e precipitação frequente. Neste regime hidrológico, assiste-se a grandes cheias na época das chuvas e caudal diminuto na época seca.

A Tabela 5 sumariza a informação dos pontos de água a serem avaliados.

Tabela 5 - Breve descrição dos pontos de água considerados no estudo da piezometria.

ID	SNIRH	Tipologia	Concelho	Freguesia	Altitude (m)	Folha
83	341/17	furo	Golegã	Azinhaga	23	27C
111	330/183	furo	Golegã	Golegã	21	27D
134	331/2	furo	Abrantes	Rio de Moinhos	27	27D
140	331/15	furo	Abrantes	Abrantes (São Vicente)	75	27D
34	391/437	furo	Benavente	Benavente	11	31C
176	377/94	poço	Salvaterra de Magos	Muge	23	31C
171	391/33	poço	Salvaterra de Magos	Foros de Salvaterra	25	31C
170	377/86	furo	Cartaxo	Valada	6	31C
165	405/17	poço	Benavente	Samora Correia	7	35A
161	418/15	poço	Benavente	Samora Correia	9	34B
163	418/4	poço	Benavente	Samora Correia	16	34B

O furo 83 construído no ano de 1976 para abastecimento público, apresenta valores médios para a superfície piezométrica igual a 15,22 m e para a profundidade média do nível de água o valor de 7,78 m (SNIRH, 06/2019). A profundidade de perfuração é de 27,2 m atravessando areias médias a grosseiras com argila, seixos e calhaus, e ralos instalados entre os 15 e 20 m.

O furo 111 tem uma profundidade de 27 m e ralos instalados entre os 16 e 21 m nas camadas de areia com calhaus rolados. O valor da superfície piezométrica média é de 18,12 m e a profundidade média do nível de água é de 2,88 m (SNIRH, 06/2019).

O furo 134 construído no ano de 1976 para abastecimento público, tem profundidade de perfuração de 35,3 m com ralos instalados nas camadas de areia grosseira com calhaus situados entre os 14 e 17 m e dos 26 aos 29 m. Os valores médios para a superfície piezométrica e para a profundidade do nível de água, são respetivamente, iguais a 21,02 m e 5,8 m (SNIRH, 06/2019).

O furo 140 construído no ano de 1956 para abastecimento público, apresenta valores médios para a superfície piezométrica igual a 59,76 m e para a profundidade do nível de água o valor de 15,24 m (SNIRH, 06/2019). A profundidade de perfuração é de 24 m, atravessando níveis argilosos e camadas de areias médias a grosseiras com argila, seixos e calhaus, e ralos instalados a profundidade dos 18,7 aos 22,7 m.

A sondagem hidrogeológica 34 localiza-se nas margens do rio Sorraia em depósitos de terraço do Tirreniano I que vão de 25 m a 40 m. O furo foi construído no ano de 2002 para observação. Apresenta valores para a superfície piezométrica igual a -2,14 m e para a profundidade média do

nível de água 13,14 m (SNIRH, 06/2019). A perfuração é de 80 m de profundidade com ralos instalados entre os 54 e os 66 m.

O poço 176 tem 5,2 m de profundidade e 1,5 m de diâmetro, e o poço 171 tem 13,1 m de profundidade e 3,2 m de diâmetro, foram construídos para captação de água para uso doméstico e rega, estando ambos incluídos na rede de monitorização da concentração de nitratos na margem esquerda do rio Tejo. O furo 170, localizado à margem direita do rio Tejo, foi construído para abastecimento público e tem profundidade de 52 m.

Os pontos de água 165, 161 e 163 encontram-se na extremidade NE da Folha 34-B a jusante no polígono das aluviões na localidade de Samora Correia. Estão enquadrados geomorfologicamente na Planície aluvial do Tejo. O poço 165 tem 8,9 m de profundidade e 4,3 m de diâmetro. É utilizado para fins domésticos e para monitorização da concentração de nitratos.

O poço 163 tem 6,5 m de profundidade e 1,6 m de diâmetro, e o poço 161 tem 7,6 m de profundidade e 1,2 m de diâmetro, sendo ambos, utilizados na captação de água para uso doméstico e na monitorização da qualidade (SNIRH).

A Figura 5.10 apresenta a evolução temporal do nível piezométrico em 11 pontos de monitorização da quantidade.

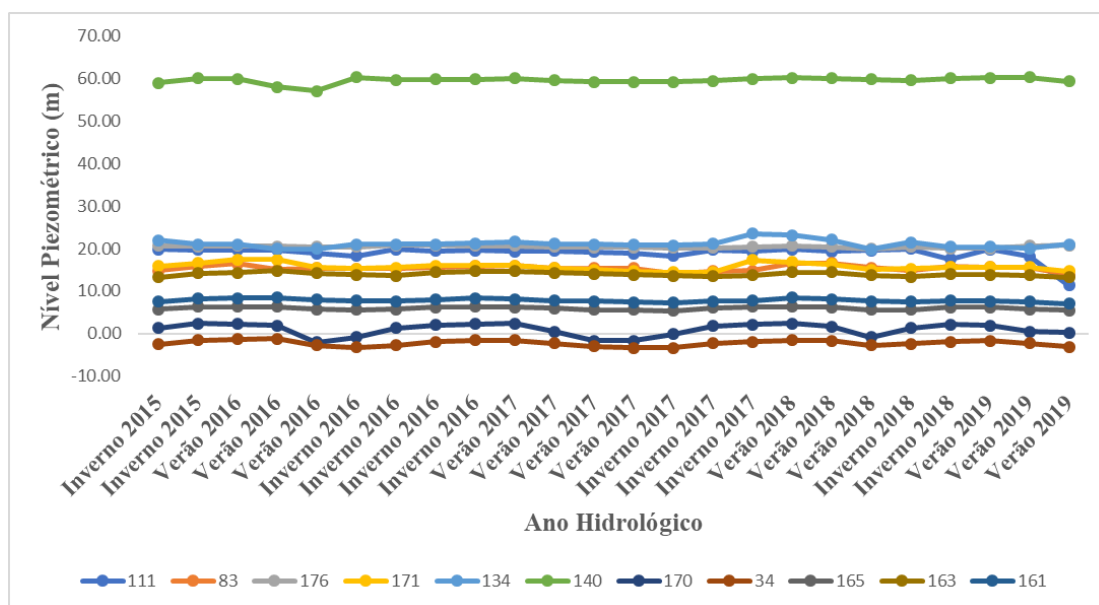


Figura 5.10 - Evolução temporal do nível piezométrico em 11 pontos de água referente aos anos hidrológicos de 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019.

No gráfico da Figura 5.10 verifica-se que os pontos de água 170 e 161 tendem a ser vulneráveis aos fenómenos de seca do Verão, como se observa nos anos de 2016, 2017 e 2018. Nota-se também que o furo 140 (*Log* de sondagem em Anexo) teve diminuição de nível no Verão de 2016. A diminuição na recarga e o aumento das extrações no período seco poderão ser responsáveis por estas variações.

O furo 111, no último ano hidrológico analisado (2018/2019), apresentou considerável amplitude piezométrica entre estações, em comparação aos anos anteriores.

Os pontos de água 171 e 134 apresentam valores mais altos no Inverno de 2017, por comparação com os outros anos.

A Figura 5.11 apresenta a evolução temporal da profundidade do nível da água em 11 pontos de monitorização da quantidade.

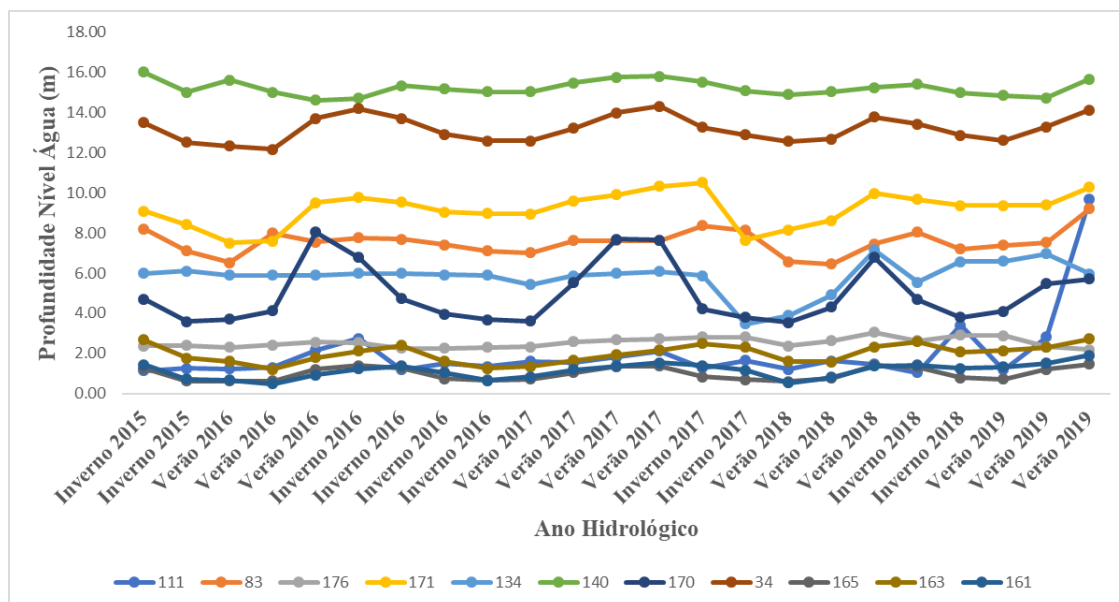


Figura 5.11 - Evolução temporal da profundidade do nível da água em 11 pontos de água, referente aos anos hidrológicos 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019.

Comprova-se que o furo 170 é vulnerável às variações de disponibilidade de água entre estações, verificando-se uma amplitude que chega a atingir quatro metros de diferença entre o período seco e chuvoso.

Os furos 134 e 171 sofreram grandes variações no ano hidrológico 2017/2018, quando comparados com os anos anteriores. O mesmo aconteceu no furo 111, no ano hidrológico 2018/2019. A diminuição na recarga, o aumento das extrações de água para abastecimento público e para a rega têm como consequência o aumento brusco da profundidade do nível da água.

Os pontos de água (83, 176, 140, 165) apresentaram poucas variações no nível da água dando evidências da capacidade de se autorregularem nos períodos de menor disponibilidade hídrica.

6. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA

A interpretação da composição físico-química de uma massa de água permite identificar zonas de contaminação, de recarga e descarga, prever direções de fluxos e determinar as origens das águas.

De acordo com o "Guia para a Avaliação de Ameaça Iminente e Dano Ambiental"²⁰ desenvolvido pela APA (2011), as águas subterrâneas têm o seu estado classificado como "Bom", quando os requisitos referentes ao Estado Quantitativo e ao Estado Químico, apresentarem, simultaneamente, bons resultados.

O Estado Quantitativo de uma massa de água subterrânea é avaliado em função do nível freático e dá indicações de como a massa de água subterrânea está a ser afetada direta ou indiretamente pelas captações.

O Estado Químico refere-se à análise da concentração de substâncias ou de poluentes, de acordo com as normas de qualidade ambiental fixadas pela legislação, e tem a avaliação da condutividade elétrica da água, como elemento identificador de intrusão salina ou de outras contaminações.

O termo poluição, quando referido à condição ou estado da água, indica haver ocorrido uma modificação, quer natural quer artificial, direta ou indireta, e que tenha afetado a sua qualidade e ou o ecossistema envolvente, de tal modo, que estas mudanças possam: representar perigo para a saúde pública; diminuir a sua adequabilidade ou eficiência; reduzir os usos benéficos da água.

Neste contexto, os iões poluentes nitrato, Fe e Mn e a condutividade elétrica, serão aqui objeto principal de estudo, no sentido de perceber se estarão a contribuir negativamente para a qualidade da massa de água aluvionar.

Para tal, será utilizado o Anexo VII do Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste²¹, onde está estabelecido os limiares para avaliação do estado químico das massas de água subterrânea. A Tabela 6 apresenta uma adaptação do referido anexo.

Tabela 6 - Valores dos limiares estabelecidos para alguns parâmetros.

Parâmetro	Limiar
Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	2500
Nitrato (mg/L)	50
Sulfato (mg/L)	250
Cloreto (mg/L)	250
pH	5,5-9

²⁰https://apambiente.pt/_zdata/Instrumentos/Responsabilidade%20Ambiental/Guia%20%20Avaliacao%20de%20Danos%20e%20Amea%20Iminente.pdf (Consultado em 23/02/2020)

²¹http://apambiente.pt/_zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoGestao/PGRH/2016-2021/PTRH5A/PGRH5A_Parte2_Anexos.pdf (Consultado em 23/02/2020)

6.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E GRANDEZAS FÍSICAS

A rede de monitorização da qualidade (SNIRH) recolhe e publica dados que auxiliam na caracterização de uma massa da água.

Com o objetivo de avaliar alguns aspetos da qualidade e facultar elementos que auxiliem o reconhecimento de pontos de contaminação no sistema, fez-se a inventariação dos seguintes parâmetros:

- Grandezas físico-químicas - Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH e temperatura da amostra ($^{\circ}\text{C}$);
- Composição iónica maioritária (Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , HCO_3^-);
- Concentrações de nitrato (NO_3^-), ferro total (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) e manganês (Mn^{2+}).

A Tabela 7 apresenta a análise estatística descritiva destes parâmetros e também inclui as relações Mg/Ca e $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$, SO_4/Cl^- e a concentração de NaCl em ppm.

Tabela 7 - Estatística dos dados físico-químicos analisados.

Parâmetros	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Sódio (mg/L Na)	60,49	38,76	53,18	15,00	456,60
Cálcio (mg/L Ca)	67,55	60,14	45,98	1,70	290,75
Magnésio (mg/L Mg)	18,34	14,51	11,74	1,90	74,80
Sulfato (mg/L SO_4)	56,39	49,72	34,90	2,40	197,90
Bicarbonato (mg/L HCO_3^-)	198,51	180,53	101,08	30,50	540,00
Cloreto (mg/L Cl)	133,20	53,93	437,40	19,55	6705,00
Nitrato (mg/L NO_3^-)	29,45	23,13	26,16	0,13	161,80
Ferro total (mg/L Fe)	0,40	0,20	0,88	0,01	12,00
Manganês (mg/L Mn)	0,13	0,09	0,14	0,01	1,01
Mg/Ca	0,32	0,30	0,16	0,06	1,12
$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	0,67	0,41	1,46	0,08	21,41
SO_4/Cl^-	0,90	0,64	0,78	0,00	4,68
Mg/Cl	0,26	0,24	0,16	0,00	1,02
NaCl (ppm)	193,25	106,64	444,91	35,55	6730,16
pH	7,11	7,07	0,40	6,10	8,22
Temperatura Amostra ($^{\circ}\text{C}$)	18,13	18,02	0,93	15,71	22,03
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	598,84	540,77	251,00	153,00	1658,50

Os aniões e catiões que fazem parte da composição iónica maioritária (Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , HCO_3^-) em geral, variam entre 0,001 mg/L e 1000 mg/L. As relações $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ e SO_4/Cl^-

auxiliam na avaliação da contaminação de origem agrícola ou industrial, com a primeira relação também sendo utilizada como indicador do sentido do fluxo subterrâneo e na caracterização da intrusão marinha. Sendo a água do mar rica em magnésio e cloreto e pobre em cálcio, as relações Mg/Ca e Mg/Cl poderão também ser úteis neste sentido. Através da relação Mg/Ca é possível diagnosticar a origem das águas, sobretudo se oriundas de rochas em que houve substituição de Ca por Mg (dolomitas).

Fazendo a análise fatorial das concentrações dos íons dissolvidos na água foram obtidos os gráficos da Figura 6.1, onde os dois primeiros eixos explicam 70% dos dados.

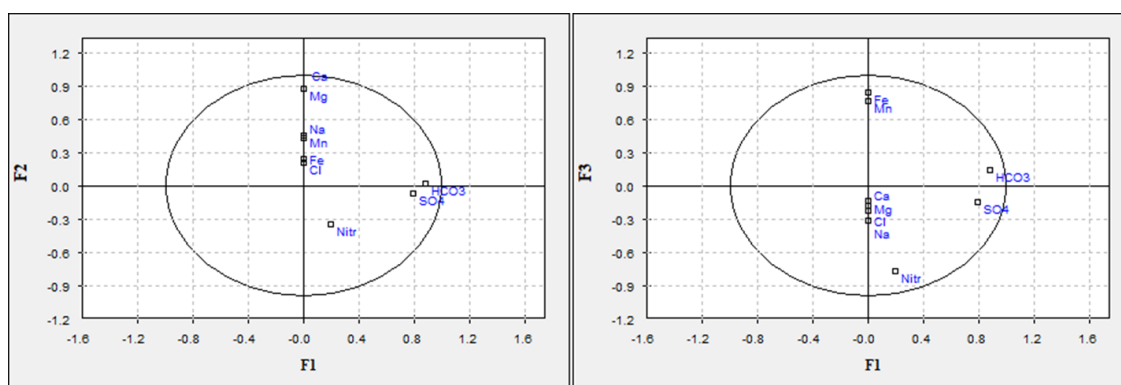


Figura 6.1 - Análise fatorial da concentração dos íons dissolvidos na água.

Este tipo de análise permite validar como estas substâncias estão relacionadas entre si. O eixo F3 identifica bem as substâncias indesejadas (nitrato, o ferro e o manganês), demonstrando a boa correlação entre o Fe o Mn. O eixo F1 explica a boa correlação dos aniões sulfato e bicarbonato, e o eixo F2 representa a boa correlação entre os catiões cálcio e o magnésio. O cloreto, em ambos os gráficos, apresenta-se associado aos catiões cálcio, magnésio e sódio.

O quadro apresentado na Figura 6.2 mostra valores da matriz de correlação entre os parâmetros avaliados²², onde se constata que o bicarbonato apresenta boa correlação com a condutividade elétrica da água e com o pH da amostra. A concentração deste elemento químico aumenta consoante estes dois parâmetros também aumentam, uma vez que a correlação é positiva. O inverso acontece quando comparado à temperatura, a qual apresenta correlação negativa.

²² O quadro pode ser analisado com melhor resolução no [anexo](#)

	SO4 (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg/Ca	Cl/HCO3	SO4/Cl	Cond Elétrica (μS/cm)	pH Amostra	Temp Amostra (°C)	Mg/Cl	NaCl (ppm)	NO3- (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO3 (mg/L)	Mg (mg/L)
SO4 (mg/L)	1,00																
Na (mg/L)	0,13	1,00															
Ca (mg/L)	0,70	0,15	1,00														
Mg/Ca	-0,13	0,29	-0,46	1,00													
Cl/HCO3	0,18	0,01	0,04	-0,04	1,00												
SO4/Cl	0,56	-0,26	0,23	-0,17	-0,23	1,00											
Cond Elétrica (μS/cm)	0,64	0,10	0,73	-0,20	-0,06	0,27	1,00										
pH Amostra	0,30	0,45	0,30	0,00	0,13	0,09	0,35	1,00									
Temp Amostra (°C)	-0,16	-0,20	-0,04	-0,13	-0,07	0,02	-0,03	0,01	1,00								
Mg/Cl	0,29	-0,24	0,32	-0,13	-0,29	0,67	0,25	0,16	0,05	1,00							
NaCl (ppm)	0,25	0,21	0,15	-0,05	0,96	-0,20	0,04	0,27	-0,11	-0,25	1,00						
NO3- (mg/L)	0,12	-0,11	0,32	-0,06	-0,04	-0,10	0,30	-0,22	-0,01	0,04	-0,07	1,00					
Fe (mg/L)	0,05	-0,09	0,11	-0,04	-0,05	0,12	0,13	0,06	0,10	0,27	-0,05	-0,13	1,00				
Mn (mg/L)	0,32	-0,03	0,22	0,03	-0,12	0,35	0,34	0,14	-0,02	0,31	-0,06	-0,08	0,61	1,00			
Cl (mg/L)	0,24	0,09	0,13	-0,08	0,97	-0,17	0,03	0,22	-0,09	-0,22	0,99	-0,06	-0,04	-0,06	1,00		
HCO3 (mg/L)	0,56	0,45	0,79	-0,28	0,01	0,19	0,60	0,46	-0,17	0,30	0,20	0,04	0,20	0,38	0,15	1,00	
Mg (mg/L)	0,63	0,55	0,72	0,11	0,01	0,01	0,56	0,38	-0,15	0,21	0,15	0,22	0,10	0,26	0,09	0,67	1,00

Figura 6.2 - Quadro com a matriz de correlação entre parâmetros.

A razão Mg/Ca apresenta correlação negativa para a condutividade elétrica, o pH, a temperatura e para a concentração de bicarbonato, significando que um aumento na concentração deste último implica uma diminuição da relação Mg/Ca. O cálcio e o bicarbonato apresentam excelente correlação positiva. Os altos valores para estes iões, poderá ser indícios de uma água pouco mineralizada.

Analisando as amostras selecionou-se algumas que apresentam resultados mais relevantes para os parâmetros avaliados, sendo a sua distribuição espacial representada na Figura 6.3.

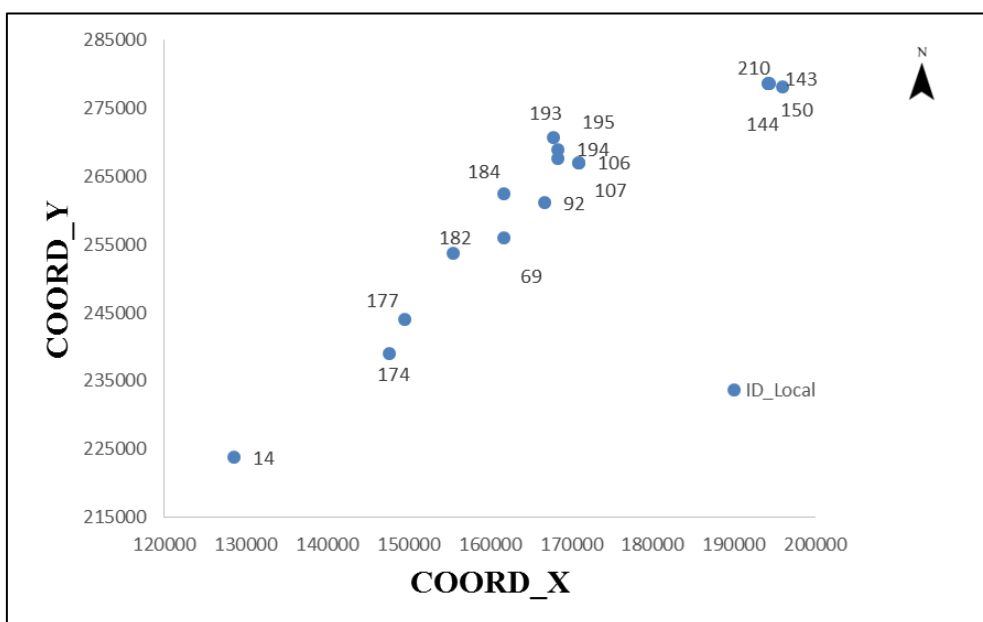


Figura 6.3 - Distribuição espacial de algumas das amostras com resultados mais relevantes (análises físico-químicas). Coordenadas Planimétricas: Hayford Gauss Militar Datum Lisboa.

Começando pelo ponto de água mais a jusante o furo 14 localizado em Castanheira do Ribatejo tem profundidade de 52,6 m. Segundo resultado de análises químicas realizadas no ano de 1967

(LNEG, 2020), este ponto de água tem, entre todas as amostras, o mais alto valor de sódio, de cloreto e de pH, e o mais baixo valor de sulfato.

O furo 174 está localizado no Cartaxo e o furo 193 em Paúl do Boquilobo, ambos com profundidade de 20 m (SNIRH, 2020), apresentam os mais altos valores para o magnésio, cloreto, sulfato, condutividade elétrica e valores médios altos para o bicarbonato, sódio e cálcio.

Os furos 106 e 107 localizados na Chamusca com profundidade de 18,40 m e 16,40 m, respetivamente. Têm análises físico-químicas do ano de 1964 (LNEG, 2020) indicando elevadas concentrações de sulfato e baixos valores para o pH.

O furo 92 localizado em Vale de Cavalos tem profundidade de 29 m. Os resultados das análises físico-químicas no ano de 1962 (LNEG, 2020) mostram altos valores para a relação SO_4/Cl^- podendo estar relacionada à contaminação por sulfatos de origem agrícola relacionada às zonas tratadas com pesticidas que contenham o sulfato na sua composição.

O furo 150 com profundidade de 21 m foi construído no ano de 1988 em Abrantes. Naquele ano, análises químicas realizadas constatarem elevadas concentrações de cloreto, sulfato e bicarbonato, bem como valores elevados para o pH, condutividade elétrica e a relação $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ (LNEG, 2020). A fonte da poluição é desconhecida, não sendo descartada a hipótese de se tratar de uma origem diferente de água, uma vez que próximo a este, aparecem outros pontos de água com concentração de cloreto superior ao admissível, consideráveis valores para a relação $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ e valores médios-altos para a condutividade elétrica, são os furos 143, 144 e 210 que têm profundidade média de 52 m, construídos no ano de 1956.

Os furos 194 e 195 localizados na Golegã têm respetivamente profundidades de 18 m e 20 m. Os furos 182 e 184, ambos localizados no concelho de Santarém, têm 24 m de profundidade. Estes pontos apresentam os valores mais elevados para o bicarbonato, cálcio, sulfato e condutividade elétrica, e valores médios para o cloreto e magnésio.

O furo 69 localizado em Alpiarça tem profundidade de perfuração de 17 m sendo a sua água utilizada para a rega. O ponto apresenta o mais baixo valor para o bicarbonato, e valores médios baixos para o sulfato, cálcio, magnésio, pH e condutividade elétrica. Poderá ser uma água muito mineralizada, uma vez que de todas as observações, esta é a que mostra o ião bicarbonato a aproximar-se da saturação. A outra hipótese será a não disponibilidade dos iões HCO_3^- e Ca^{2+} na massa de água.

O furo 177 com profundidade de 18 m localizado no Cartaxo tem a mais alta relação Mg/Cl .

Nos gráficos apresentados na Figura 6.4, observa-se alguma dispersão dos valores do bicarbonato em função do pH e a boa correlação do anião com a condutividade elétrica da água. A concentração deste elemento químico aumenta consoante estes dois parâmetros também aumentam (correlação positiva).

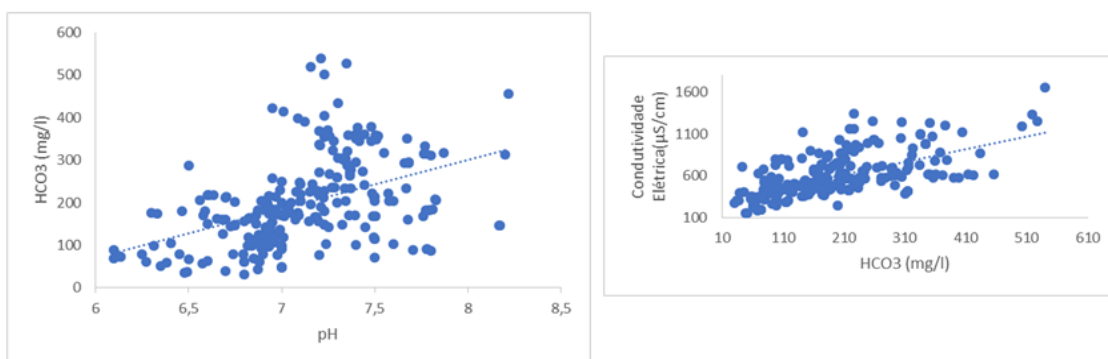


Figura 6.4 - Gráfico da concentração de bicarbonato e o pH, e da condutividade elétrica da água e a concentração de bicarbonato.

A condutividade elétrica (C em $\mu\text{S}/\text{cm}$) da água é função da concentração iônica (c em ppm) e da velocidade de deslocamento dos iões (afetada pela viscosidade da água), designada por mobilidade iônica (v em m/s).

Estudada em termos de resistividade elétrica (R em ohm.m), escreve-se em função da quantidade dos sais dissolvidos e da espécie iônica em solução, variando de acordo com o grau de mineralização, o contexto da evolução geológica, a permeabilidade e a temperatura, sendo possível aferir valores através da seguinte fórmula (6.1), Chappelier (1992):

$$C = 1/R = f(c_1 + v_1 + c_2 + v_2 \dots) \quad (6.1)$$

As grandezas físicas condutividade elétrica, pH e temperatura, são, na figura seguinte (Figura 6.5), avaliadas em termos de correlação.

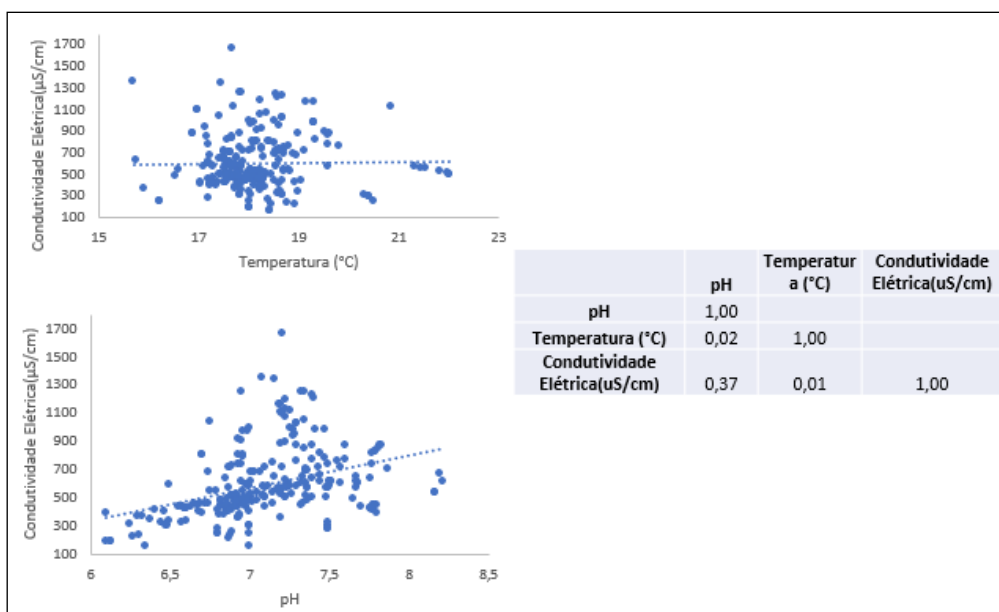


Figura 6.5 - Gráficos da condutividade elétrica, em função da temperatura e do pH, e tabela auxiliar com indicação entre a correlação existente entre eles.

Pela análise dos valores apresentados no gráfico e na tabela auxiliar, é possível observar a independência entre a temperatura da água e a condutividade elétrica. Entretanto, verifica-se a existência de alguma correlação entre a última e o pH das amostras, mostrando a importância de reações de interação água-rocha ou mistura com águas salinas.

A massa de água do sistema aquífero, quando avaliada em termos de temperatura, é denominada “águas frias” (águas captadas a menos de 50 m de profundidade). Aquelas captações a profundidades superiores aos 50 m têm a temperatura aumentada de 1°C a cada 30 m.

A Figura 6.6 apresenta a análise da correlação da temperatura com os seguintes parâmetros: piezometria; profundidade do nível da água; espessura produtiva e profundidade da base do aquífero. Sendo os parâmetros avaliados em função da geologia (a-aluviões, Q-depósitos de terraços, A1-areias superficiais).

Em todos os gráficos, a temperatura é maior nos depósitos de terraços (Q), algo já expectável, uma vez que, estes afloramentos apresentam maior profundidade da base e maior espessura produtiva.

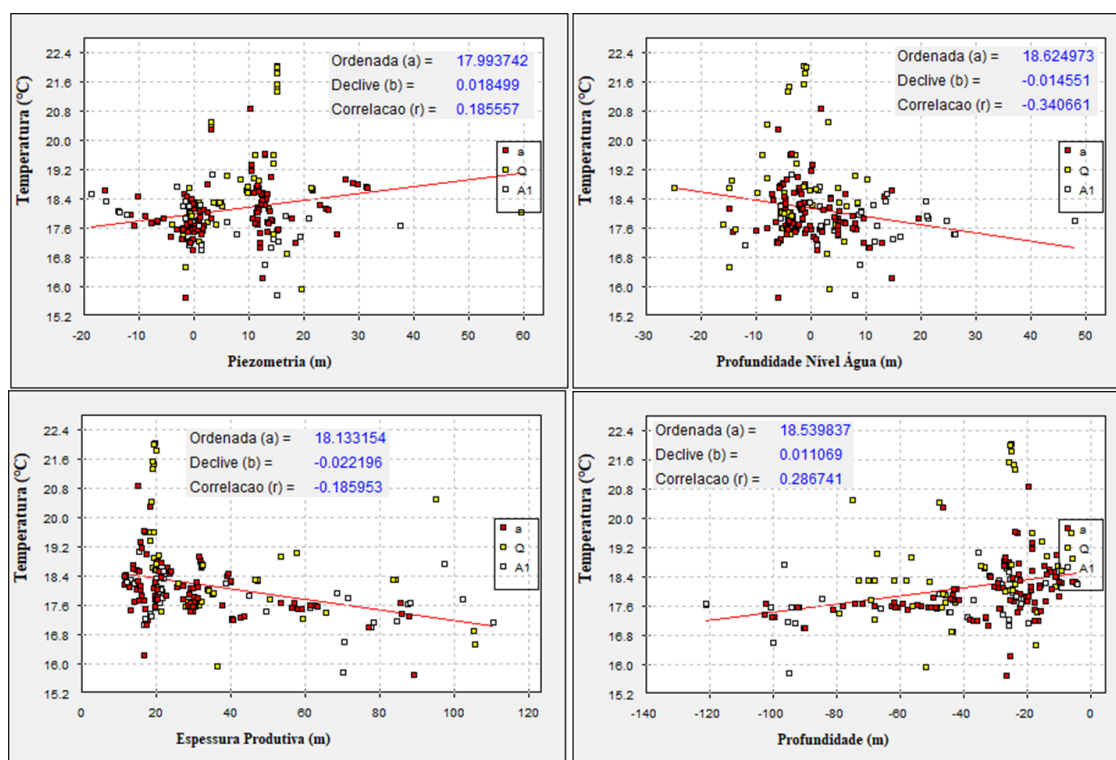


Figura 6.6 - Análise fatorial entre a temperatura e: piezometria; profundidade do nível da água; espessura produtiva e profundidade da base do aquífero.

6.2. FÁCIES QUÍMICAS DA ÁGUA

Utilizando o programa Qualigraf para análise da qualidade da água do sistema, selecionou-se cinco furos dentro da área de estudo, sendo quatro destes, amostras de água do aquífero aluvionar e uma amostra de água do aquífero terciário (ponto 74).

No setor jusante considerou-se os furos 18 e 44. O furo 18 situa-se no Carregado, com profundidade perfurada de 43,5 m e ralos instalados entre os 22 e os 32 m. A fácies química da água é sódica cloretada. O furo 44 localizado em Foros de Salvaterra, está perfurado até aos 130 m com ralos instalados entre os 60 e os 118 m. A água é classificada como mista, sendo o bicarbonato o anião dominante.

Na zona central do polígono, o ponto de água 74 está localizado em Casalinho no concelho de Almeirim. O furo está perfurado até aos 220 m de profundidade e tem ralos instalados entre os 123 e os 203 m de profundidade. A fácies da água é do tipo mista bicarbonatada.

No setor montante avaliou-se as amostras de água dos furos 134 e 140, localizados em Abrantes. O furo 134 está perfurado até aos 35,3 m com ralos instalados nas camadas de areia grosseira com calhau situados entre os 14 e 17 m e dos 26 aos 29 m. O furo 140 tem profundidade de perfuração de 24 m, atravessando níveis argilosos e camadas de areias médias a grosseiras com argila, seixos e calhaus, e ralos instalados a profundidade dos 18,7 aos 22,7 m. Ambas as amostras de água são pouco mineralizadas, e estão classificadas como mistas.

As Figuras 6.7 a 6.9 apresentam a tabela de classificação das fácies das águas, o Diagrama de Piper (Figura 6.8) e a distribuição da composição iónica maioritária e respectivos Diagramas de Stiff de cada amostra (Figura 6.9).

Nº	Nome da Amostra	Na + k (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO3+HCO3 (mg/L)	SO4 (mg/L)	Classificação das Águas
1	134	24.04	32.97	11.37	37.93	38.10	22.93	Mista
2	74	31.20	40.99	10.32	42.46	142.90	43.39	Mista Bicarbonatada
3	44	60.77	31.70	16.44	66.32	113.09	44.70	Mista
4	18	213.98	114.26	42.88	362.22	358.00	84.16	Sódica Cloretada
5	140	18.27	11.42	5.81	32.58	69.00	17.92	Mista

Figura 6.7 -Tabela de classificação iónica da água amostrada.

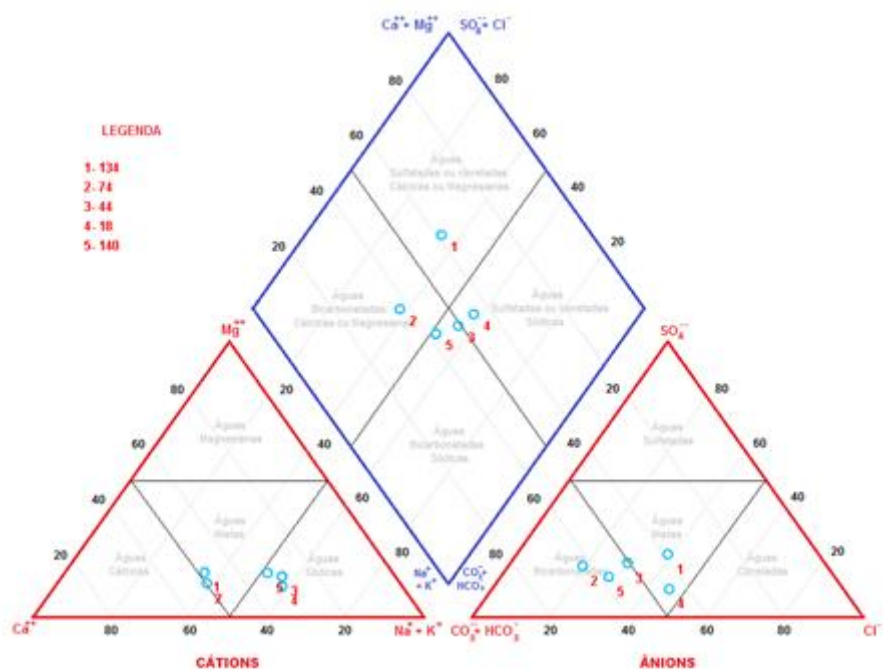


Figura 6.8 - Diagrama de Piper. Fácies da água das amostras avaliadas.

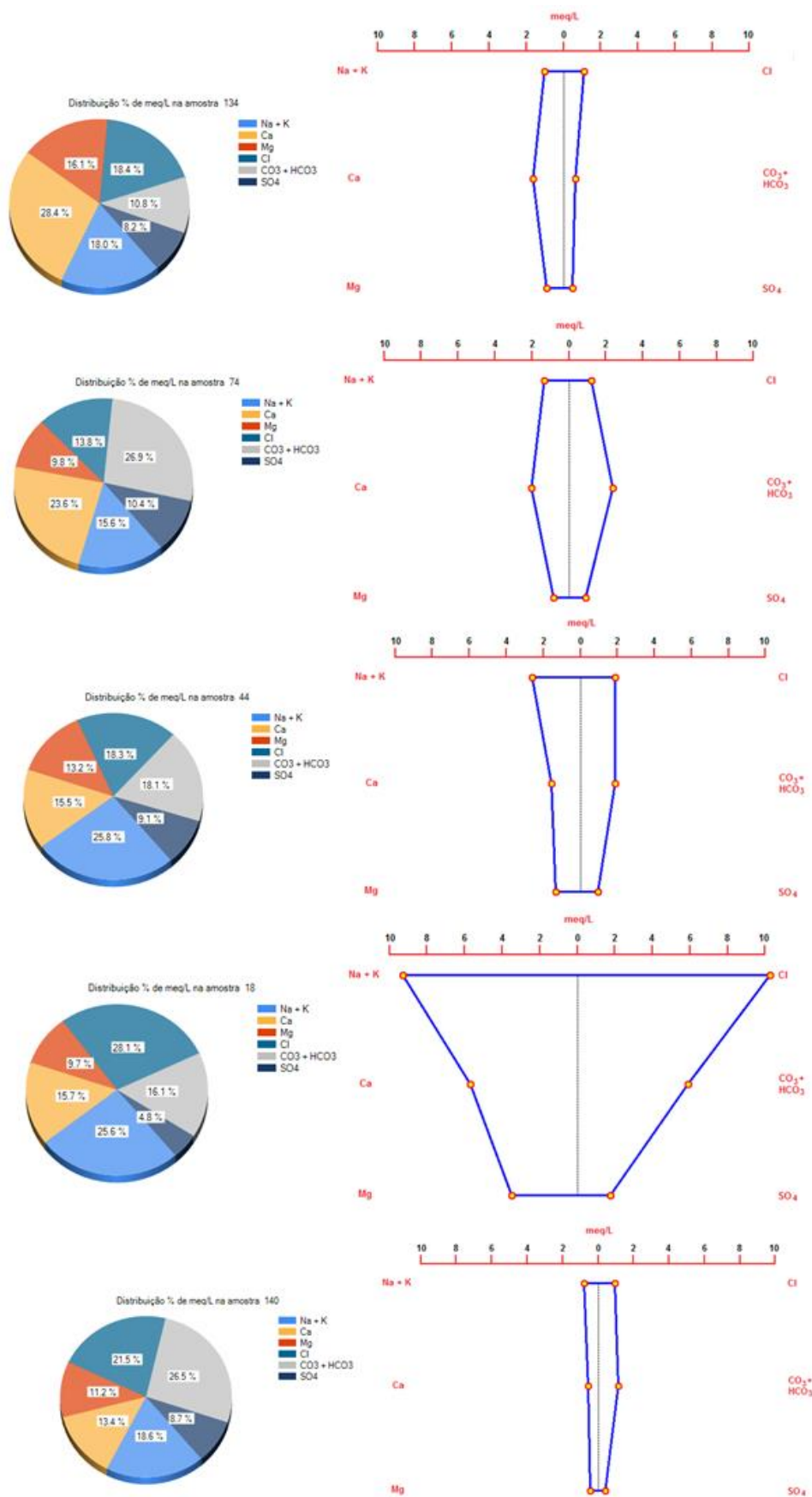


Figura 6.9 - Distribuição da composição iônica majoritária e Diagrama de Stiff das amostras de água avaliadas.

6.3. CONTAMINAÇÃO

A interação entre a água subterrânea e a água superficial, no aquífero aluvionar, é comprovada pela densa rede de drenagem e pelo nível piezométrico muito próximo da superfície. Sendo o aquífero alimentado tanto por águas superficiais (cursos de água) como pelo aquífero terciário, é inevitável que, estando a água superficial contaminada, também o aquífero esteja contaminado.

Os contaminantes podem ocorrer nos estados sólido, líquido ou gasoso. A mobilidade, toxicidade e disponibilidade dos poluentes depende das condições geoquímicas do meio (pH, matéria orgânica, conteúdo argiloso, microbactérias e a composição química). O transporte dos contaminantes no meio aquoso é regulado por processos físicos de advecção, difusão e dispersão que dependem das características físicas do fluxo de água, da permeabilidade e anisotropia do substrato rochoso, da mobilidade do contaminante em relação à água (retardação) e das reações geoquímicas e bioquímicas com o meio.

A Figura 6.10 faz a identificação espacial de algumas substâncias indesejadas na química da água. Em pontos de água no setor montante (região de Torres Novas e Abrantes) selecionou-se as observações que apresentaram valores para a condutividade elétrica da água superior a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, concentrações de sulfato maior que 150 mg/L, cloreto maior que 200 mg/L, concentração de NaCl maior que 250 ppm, e algumas relações químicas.

O que se observa é que as elevadas concentrações de cloreto e NaCl no setor centro-jusante do aquífero poderá ser efeito das oscilações das marés. Este fenómeno tem como consequência a entrada de água marinha em direção ao aquífero. Estudos hidrogeoquímicos mais avançados poderão confirmar a origem destes cloretos e a estimar a posição da cunha salinha.

As práticas agrícolas muito comuns nas margens do rio Tejo, poderão ser explicar as elevadas concentrações de sulfato, não descartando também a hipótese de se tratar de uma origem diferente de água.

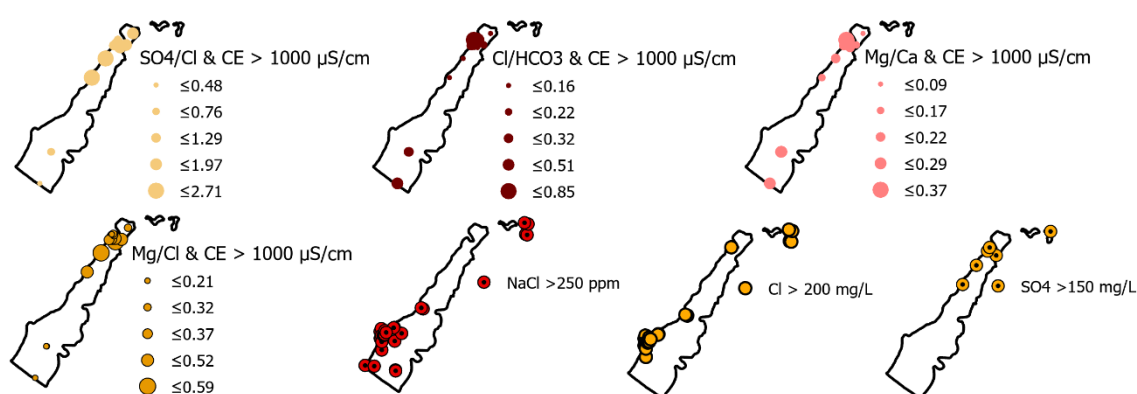
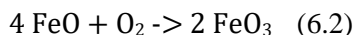


Figura 6.10 – Reconhecimento das elevadas concentrações de cloreto e sulfato.

6.3.1. FERRO E MANGÂNES

As precipitações de hidróxido de ferro são muito comuns quando as águas subterrâneas entram em contato com ambientes oxidantes (oxigénio atmosférico). A oxidação/redução é o processo de meteorização química, pelo qual o oxigénio atmosférico reage com os iões dos minerais,

produzindo óxidos. O ferro, que faz parte da composição essencial de cerca de 300 minerais, pode ser facilmente oxidado pela seguinte reação (6.2):



Por este processo, formam-se novos minerais, insolúveis em água, que acabam por se precipitar no meio em que se encontram. O mapa da Figura 6.11 faz o reconhecimento das elevadas concentrações de ferro na massa de água das Aluviões do Tejo ($\text{Fe} > 0.3 \text{ mg/L}$), tendo por critério o valor máximo admissível (VMA) preconizado no Anexo I do Decreto-Lei 236/98²³.

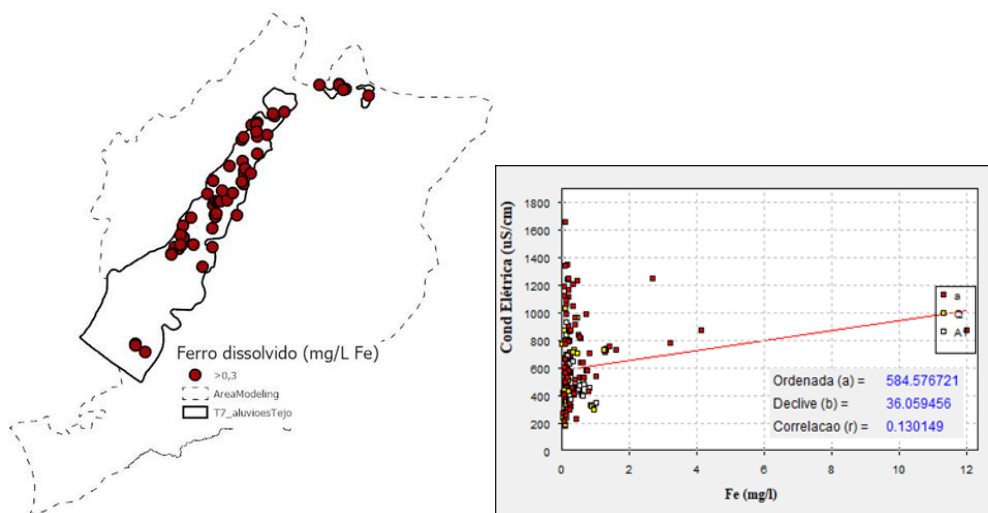


Figura 6.11 - Localização dos pontos de água com teor em ferro, maior do que o valor máximo admissível (VMA). Gráfico de correlação entre condutividade elétrica da água e o ferro.

O gráfico apresenta a correlação entre a concentração de Fe e a condutividade elétrica da água classificados segundo a geologia (a-aluviões, Q-Terraços e A1-areias superficiais). Verifica-se uma correlação positiva entre os dois parâmetros, sendo as elevadas concentrações do elemento mais frequente nas aluviões.

O mapa da Figura 6.12 apresenta a localização de pontos de água dentro do sistema aquífero, com concentrações de manganês maiores do que o valor máximo admissível ($\text{Mn} > 0.05 \text{ mg/L}$) preconizado no Anexo I do Decreto-Lei 236/98, e o gráfico de correlação destes valores com a condutividade elétrica.

Mais uma vez verifica-se que a condutividade elétrica da água aumenta com o aumento da concentração deste elemento químico, com ocorrência maioritária nas aluviões.

²³ <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/1998/08/176A00/36763722.pdf> (Consultado em 20/02/2020)

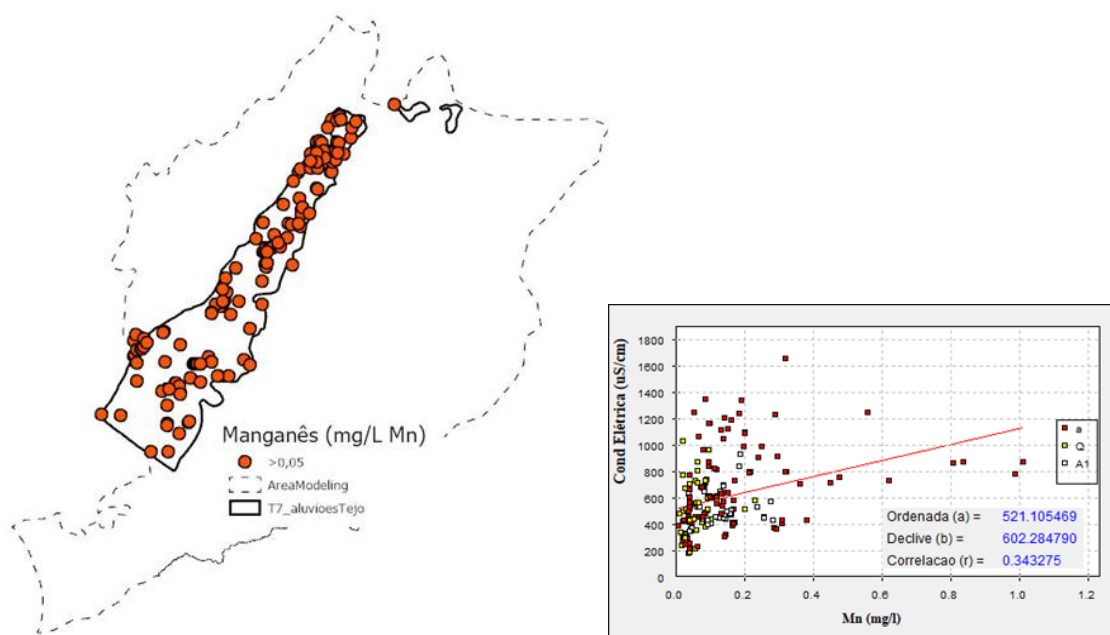


Figura 6.12 - Localização dos pontos de água com teor em manganês, maior do que o valor máximo admissível (VMA). Gráfico de correlação entre a condutividade elétrica da água e o teor em manganês.

A grande predominância de valores acima do recomendado para o ferro e o manganês, poderá estar relacionada com a ocorrência de rochas ígneas e metamórficas que rodeia a área de estudo, nomeadamente, os Ortognaisses migmatíticos do Maciço de Beja, os Gnaisses tonalíticos e Xistos, grauvaques, chertes negros e vulcanitos ácidos, do Proterozóico do Bordo Noroeste da Zona de Ossa Morena. Rochas com grande variedade mineral, e que pela alteração dos silicatos têm, entre outros produtos minerais, a olivina e biotite, que apresentam ferro e manganês na sua constituição.

Além disso, deve-se ter em consideração, a participação do ferro na constituição dos minerais do grupo das argilominerais, nomeadamente, Ilita e Vermiculita. A presença de matéria orgânica nos lodos pode promover condições de oxi-redução favorecendo deste modo, a dissolução daqueles metais.

6.3.2. NITRATO

A deterioração da qualidade da massa de água subterrânea vem sendo provocada principalmente pelo uso intensivo de fertilizantes e pesticidas. A contaminação por práticas agrícolas apresenta um caráter difuso, persistente, e que abrange extensas áreas. Os fertilizantes inorgânicos como o amoníaco, sulfato de amónio, nitrato de amónio e carbonato de amónio e os orgânicos, como a ureia, são os responsáveis pelo incremento de nitrato, nitrito e amónio nas águas subterrâneas.

O cenário de contaminação é ainda menos favorável quando os fertilizantes são aplicados em zonas de regadio com solos permeáveis, em aquíferos livres, em áreas planas (baixo declive), e onde o nível da água está muito próximo da superfície, ou onde existe conexão direta com um curso de água.

O mapa da Figura 6.13 mostra a localização de pontos de água com concentrações de nitrato superior ao limiar estabelecido para avaliação do estado químico das massas de água subterrânea (Anexo VII do Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste²⁴). O mapa pôde então ser comparado com o mapa de isovalores de nitrato (verde < 25 mg/L, amarelo < 50 mg/L e vermelho > 50 mg/L) disponibilizado pelo SNIRH (2019) e comprova a contaminação por nitratos nos pontos apresentados no mapa (nitrato > 50 mg/L).

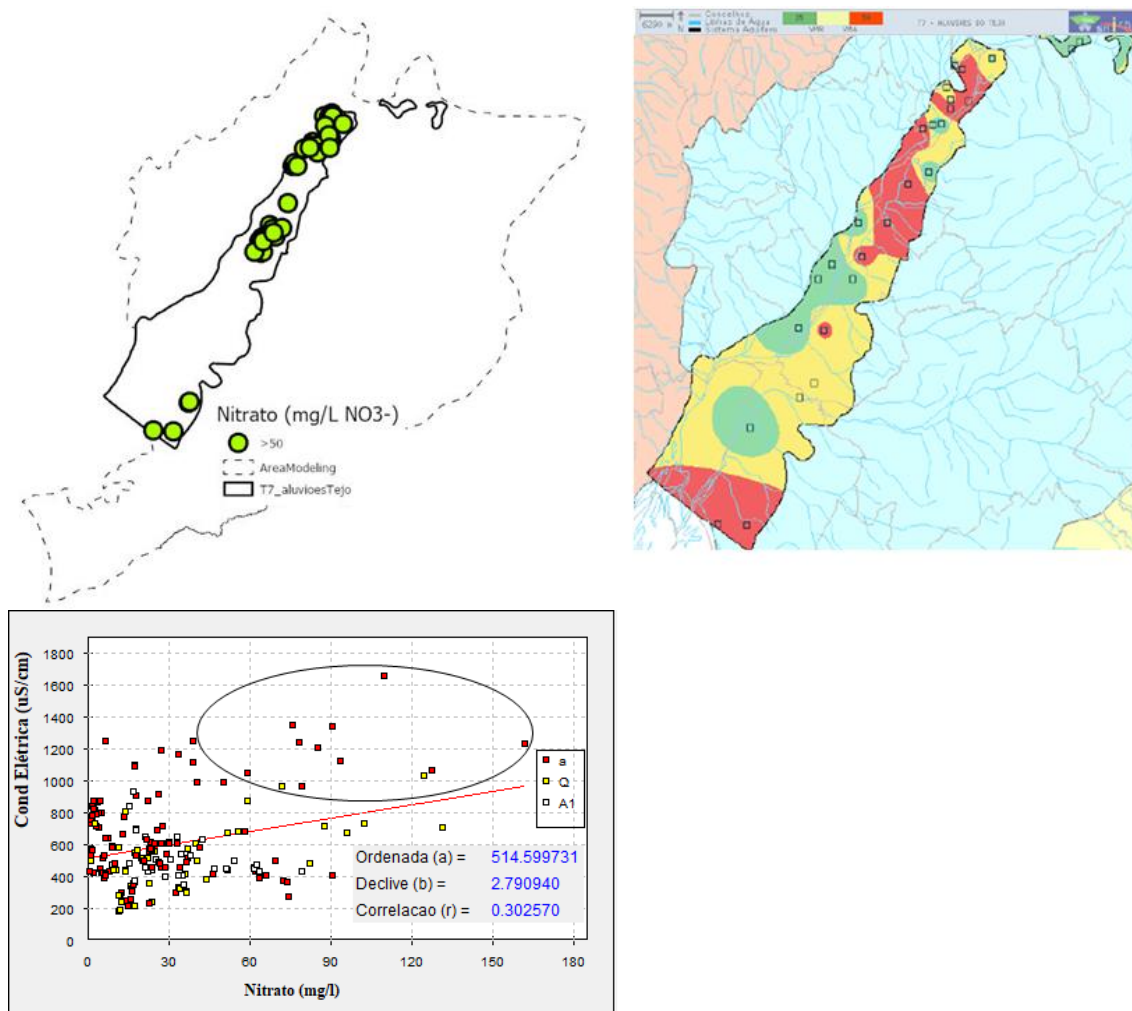


Figura 6.13 - Localização dos pontos de água com teor em nitrato, maior do que o valor máximo admissível. Gráfico de correlação entre a condutividade elétrica da água e o teor em nitrato.

Pela análise do gráfico de correlação da concentração de nitrato versus a condutividade elétrica, verifica-se a correlação positiva entre a substância e o parâmetro físico-químico. A contaminação é mais frequente nas aluviões do setor montante, sendo possível a identificação de 9 pontos de água com concentração de nitrato superior ao limiar e condutividade elétrica superior a 1000 $\mu\text{S/cm}$ (190, 201, 194, 199, 195, 803, 97, 160, 189).

²⁴http://apambiente.pt/_zdata/Politicass/Agua/PlaneamentoeGestao/PGRH/2016-2021/PTRH5A/PGRH5A_Parte2_AneXos.pdf (Consultado em 23/02/2020)

7. CONCLUSÃO

A extensiva revisão da literatura durante o desenvolvimento do trabalho e na fase de validação dos resultados foi fundamental para que se alcançasse os objetivos propostos. O estudo dos *logs* de sondagens permitiu o diagnóstico dos níveis produtivos e das camadas argilosas e lodosas, e a construção do modelo geométrico do aquífero das Aluviões do Tejo.

Com a interpretação dos relatórios de ensaios de bombeamento, estimou-se os parâmetros hidráulicos do aquífero e a caracterização do seu funcionamento hidráulico.

O modelo mostra uma correlação negativa entre a profundidade do sistema aquífero e a sua produtividade, apesar da presença de níveis intercalados de baixa permeabilidade. Esta relação é espacialmente bem definida entre os setores montante e jusante. A montante, a espessura produtiva do aquífero varia entre os 19 e os 29 m não ultrapassando os 40 m de profundidade. Naquele setor encontram-se valores de caudal específico superiores a 1500 m²/dia e condutividade hidráulica que ultrapassa os 60 m/dia. No setor jusante, a profundidade da base do aquífero ultrapassa os 70 m, apresentando caudal específico inferior a 900 m²/dia e condutividade hidráulica média de 30 m/dia.

Os poucos ensaios disponíveis no setor jusante na margem esquerda do rio Tejo, podem ter causado erros nas estimativas dos parâmetros hidráulicos. Os valores para condutividade hidráulica parecem ter sido subestimados quando comparados àqueles apresentados na literatura. Estes erros poderão estar associados a sobrestimação da espessura produtiva do aquífero.

A extração de grande volume de água do sistema aquífero vem contribuindo para a inversão do sentido de fluxo, que no pior dos cenários, pode o rio Tejo passar a alimentar o aquífero regional, tornando-se um rio influente. Outra consequência, é o avanço da cunha salina em direção ao interior do aquífero, caracterizando o fenómeno da intrusão marinha.

O estudo da piezometria demonstra oscilações significativas entre o Inverno e o Verão, atingindo uma amplitude máxima de 4 m entre estações. Estas variações estão relacionadas a disponibilidade hídrica reduzida em alguns meses do Verão devido a redução na precipitação/recarga do aquífero regional e a um maior volume na extração de água que se verifica no verão. O equilíbrio dinâmico do sistema aluvionar é mantido pela densa rede de drenagem existente na bacia e pela descarga do aquífero regional.

As concentrações de ferro e manganês acima dos valores máximos recomendados, ocorrem distribuídas espacialmente por todo o polígono das aluviões, e por vezes coincidindo com locais onde os níveis argilosos e lodosos são dominantes. Esta ocorrência sugere ser de origem natural, podendo estar associada à constituição mineralógica do grupo das argilominerais e a presença de matéria orgânica nos lodos, que acaba por promover ambientes óxido-redutores, favorecendo deste modo, a dissolução daqueles metais.

O uso intensivo de fertilizantes inorgânicos como o amoníaco, sulfato de amónio, nitrato de amónio e orgânicos, como a ureia, bem como de agrotóxicos com sulfato na sua composição, têm provocado a deterioração da qualidade da massa de água subterrânea, comprometendo a utilização para o consumo humano e até para práticas agrícolas.

O cenário da poluição de origem agrícola é agravado no setor montante, verificando-se concentrações de nitrato superiores aos limiares estabelecidos pelas normas de qualidade em vigor.

A exploração sustentável da massa de água subterrânea passa por implementar captações eficientes capazes de dar resposta às necessidades de consumo sem interferir com o equilíbrio do sistema aquífero, ou com os sistemas ecológicos que dependam dele.

Preservar e manter a massa de água subterrânea é, definitivamente, a melhor decisão. A massa de água subterrânea, além de estar protegida de perdas por evaporação, está menos suscetível as pressões antropogénicas quando comparada com as águas superficiais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2011) - Guia Para a Avaliação de Ameaça Iminente E Dano Ambiental. Responsabilidade Ambiental. Agência Portuguesa Do Ambiente, 124p.
(<https://Apambiente.Pt/ Zdata/Instrumentos/Responsabilidade%20ambiental/Guia%20%20avaliacao%20de%20dano%20e%20ameaa%20iminente.Pdf>)
(Consultado em 18/02/2020)
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., Gomes, A. J. (2000) - Sistemas aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia da Fac. Ciencias Univ. Lisboa/Instituto da água, Lisboa, 661p.
- Bofana, J. R., & Costa, A. C. (2017). Comparison of spatial interpolators for variability analysis of soil chemical properties in Cuamba (Mozambique). African Journal of Agricultural Research, 12(25), 2153-2162.
(<https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/32E487964920>)
(Consultado em 08/12/2019)
- Briggs, R. (2012) - Spatial autocorrelation concepts. Henan University
(<https://Personal.Utdallas.Edu/~Briggs/>) Consultado em 09/02/2020)
- Chappelier, D. (1992) - Well Logging in Hydrogeology. Rotterdam: A. A. Balkena Publishers. 175p.
- Costa, A. (2009) - Geoestatística: Motivação e Conceitos Básicos. Invited talk: "Geostatistics: Motivation and Basic Concepts".
(https://www.researchgate.net/publication/266290911_Geoestatistica_Motivacao_e_Conceitos_Basicos) (Consultado em 09/02/2020)
- Costa, A. (2016) - Tutorial: IDW - Inverse Distance Weighting. Geostatistics, NOVA Information Management School, Lisbon, Portugal.
- Costa, A. (2016) - Tutorial: Kriging. Geostatistics, NOVA Information Management School, Lisbon, Portugal.
- Custodio, E. & Llamas, M.R. (1996) - Hidrología Subterránea. Segunda Edición. Publicaciones Omega, 2347p.
- Decreto-Lei N.º 347/2007 (2007). Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Delimitação georreferenciada das Regiões Hidrográficas. Diário da República n.º 202/2007, Série I de 2007-10-19
(<https://dre.pt/application/conteudo/629135>) (Consultado em 09/02/2020)
- Decreto-Lei N.º 117/2015 (2015). Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Alteração da delimitação georreferenciada das Regiões Hidrográficas. Diário da República n.º 120/2015, Série I de 2015-06-23
(<https://dre.pt/application/conteudo/67541744>) (Consultado em 09/02/2020)

- Decreto-Lei n.º 236/98 (1998). Ministério do Ambiente. Normas de qualidade para proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas. Diário da República n.º 176/1998, série I de 1998-08-01 (<https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/1998/08/176A00/36763722.pdf>) Consultado em 09/02/2020)
- Durão, R., Pereira, M. J., Costa, A. C., Côrte-Real, J. M., & Soares, A. (2009) - Indices of precipitation extremes in Southern Portugal - a geostatistical approach, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 241-250. <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/241/2009/nhess-9-241-2009.pdf> (Consultado em 08/12/2019)
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979) - Groundwater. Prentice Hall. Englewood Cliffs, 604p.
- Gonçalves, F.; Zbyszewski, G.; Carvalhosa, A. & Coelho, A.P. (1979) - Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50 000 e Notícia Explicativa da Folha 27-D Abrantes. Serviços Geológicos De Portugal, Lisboa, 75p. (<http://geoportal.lneg.pt/Geoportal/Egeo/Downloadcartas/Noticias/27-D.Pdf>) Consultado Em 09/02/2020)
- Kullberg, J.C.; Rocha, R.B.; Soares, A.F.; Rey, J.; Terrinha, P.; Callapez, P. & Martins, L. (2006) - A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. (R. Dias, A. A. Araújo, P. Terrinha & J.C. Kullberg, Eds.). Geologia de Portugal no contexto da Ibéria. Universidade Évora, p 317 - 368. ([https://run.unl.pt/bitstream/10362/1487/1/Bacia_Lusitaniana%20\(VIICNG\).Pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/1487/1/Bacia_Lusitaniana%20(VIICNG).Pdf), Consultado em 16/02/2020)
- Lobo-Ferreira, J.P., Oliveira, M. Mendes & Ciabatti, P.C. (1995) - Desenvolvimento de um Inventário da Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 1. Laboratório Nacional De Engenharia Civil, Lisboa.
- Logan, M.A.G. - Estimating transmissibility from routine production tests of waterwells. *Ground Water*, 2, 1964, Pp. 35-37.
- Manuppella, G.; Barbosa, B.; Azerêdo, A. C.; Carvalho, J.; Crispim, J.; Machado, S.; & Sampaio, J. (2006) - Notícia explicativa da Folha 27-C Torres Novas da Carta Geológica de Portugal na Escala de 1/50.000. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação - Ineti, 81p. Consultado em 09/02/2020 (<http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/DownloadCartas/noticias/27-C.pdf>)
- Manuppella, G.; Ferreira, A. B.; Dinis J. & Callapez P.; Ribeiro, M. L.; Pais, J.; Rebêlo, L.; Cabral J. & Moniz C.; Baptista, R.; Henriques P. & Falé P.; Lourenço, C.; Sampaio, J. & Midões, C.; Zbyszewski, G. (2011) - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000 e notícia explicativa da Folha 34-B Loures. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa, 61p. ([Http://Geoportal.Lneg.Pt/Geoportal/Egeo/Downloadcartas/Noticias/34-B.Pdf](http://Geoportal.Lneg.Pt/Geoportal/Egeo/Downloadcartas/Noticias/34-B.Pdf)) Consultado em 09/02/2020)
- Mendonça, J. J. L. (1990) - Estudo estatístico dos parâmetros hidráulicos do sistema aquífero do Tejo. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra, Nº 110, 1-20p.

- Mendonça, J. J. L. (1990) - Sistema Aquífero Aluvionar do Vale do Tejo (Vila Nova da Barquinha a Alverca): Características e Funcionamento Hidráulico. Dissertação apresentada à Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Centro de Geociências da Universidade de Coimbra. 343p.
- Mendonça, J. J. L. (2010). Caracterização Geológica e Hidrogeológica da Bacia Terciária do Tejo-Sado. Tágides - Os Aquíferos das Bacias Hidrográficas do Rio Tejo e das Ribeiras Do Oeste. in: https://www.apambiente.pt/_zdata/divulgacao/publicacoes/tagides/tagides_07%20.pdf
- Mendonça, J. J. L. (2018) As Águas subterrâneas e o abastecimento de água a Lisboa: As captações da EPAL. 1ª Ed. Lisboa: EPAL, 2018. 225p; 25 cm. - (EPAL Technical Editions; 4). ISBN 978 989 8620 06 4
- Organização das Nações Unidas - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS (2015) (<https://unric.org/pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/> Consultado em 09/02/2020)
- PGRH5, Parte 2. (Maio de 2016). Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5) - 2º Ciclo. Parte 2 - Caracterização e Diagnóstico - Anexos. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Plano de Gestão de Região Hidrográfica 2016/2021 (Maio 2016) - Parte 2 - Caracterização e diagnóstico. Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5). Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- Ribeiro, M. M. S. (1998) - Contribuição para o conhecimento Hidrogeológico do Cenozoico na Bacia do Baixo Tejo. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia. Univ. Nova De Lisboa. 270 Pag.
- Soares A. (2000). Geoestatística para as ciências da Terra e do Ambiente. Instituto Superior Técnico, IST Press. Lisboa, Portugal.
- Vis, G., & Kasse, C., 2009. Late Quaternary Valley - L1 Succession of The Lower Tagus Valley, Portugal: Sediment. Geol., 221, No. 1-4, 19-39p. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0037073809001821?via%3Dihub> Consultado em 05/08/2019)
- Zbyszewski, G. (1953) - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia explicativa da Folha 31-A Santarém. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 17p. (<http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/DownloadCartas/noticias/31-A.pdf> Consultado em 09/02/2020)
- Zbyszewski, G. (1964) - Notícia. Explicativa da Folha 2 (Loures), escala 1/50 000, Carta Geológica dos Arredores de Lisboa. Serviço Geológico de Portugal.
- Zbyszewski, G.; Manuppella, G. & Ferreira, O. Veiga (1971) - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000 e notícia explicativa da Folha 27-C, Torres Novas. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 46p.

Zbyszewski, G.; Torre de Assunção, C. (1965) - Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 e notícia explicativa da Folha 30-D Alenquer. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 104p.
(<http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/DownloadCartas/noticias/30-D.pdf>)
Consultado em 09/02/2020)

Zbyszewski, G.; Veiga Ferreira, O. (1968) - Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 e notícia explicativa da Folha 31-C Coruche. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 44p.
(<Http://Geoportal.Lneg.Pt/Geoportal/Egeo/Downloadcartas/Noticias/31-C.Pdf>)
Consultado em 09/02/2020)

Zbyszewski, G.; Veiga Ferreira, O. (1969) - Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 e notícia explicativa da Folha 35-A Santo Estevão. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 27p.
(<Http://Geoportal.Lneg.Pt/Geoportal/Egeo/Downloadcartas/Noticias/35-A.Pdf>)
Consultado em 09/02/2020)

Páginas da internet

http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/ (Consultado em 09/02/2020)

http://www.dgterritorio.pt/dados_abertos/cos/ (Consultado em 09/02/2020)

<https://snirh.apambiente.pt/snirh/atlasagua/sistemasaquiferos/vertices/T7.zip> (Consultado em 09/02/2020)

<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d52d4dc61fac482ca95f1369df532d60> (Consultado em 09/02/2020)

http://cdr.eionet.europa.eu/help/WFD/WFD_521_2016/ (Consultado em 09/02/2020)

<https://apambiente.pt/> (Consultado em 09/02/2020)

<https://snirh.apambiente.pt/> (Consultado em 09/02/2020)

http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/bds/pontos_agua/default.aspx (Consultado em 23/02/2020)

<https://apambiente.pt/zdata/Instrumentos/Responsabilidade%20Ambiental/Guia%20%20Avaliacao%20de%20Dano%20e%20Ameaa%20Iminente.pdf> (Consultado em 23/02/2020)

¹http://apambiente.pt/zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoGestao/PGRH/2016-2021/PTRH5A/PGRH5A_Parte2_Anexos.pdf (Consultado em 23/02/2020)

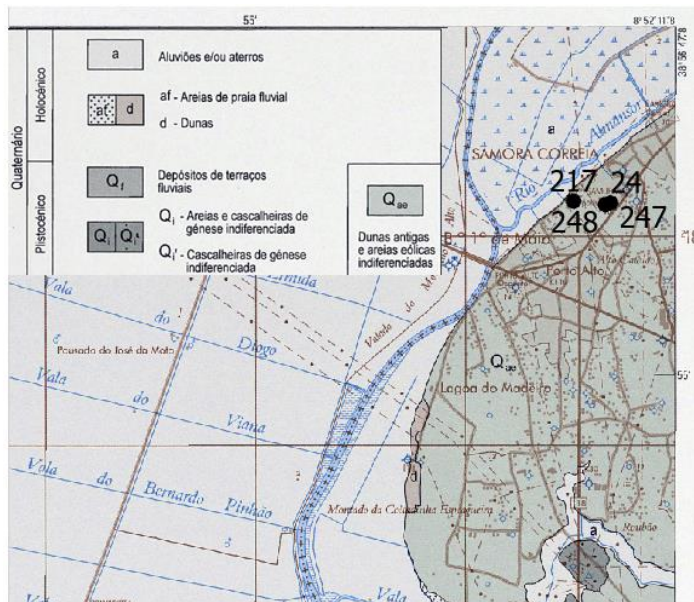
<https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=15&sub3ref=93> (Consulta do em 23/02/2020)

Os ficheiros resultantes do trabalho de modelação geoestatística estarão disponíveis em: <https://github.com/PlusWorldWater/AluvioesTejo>

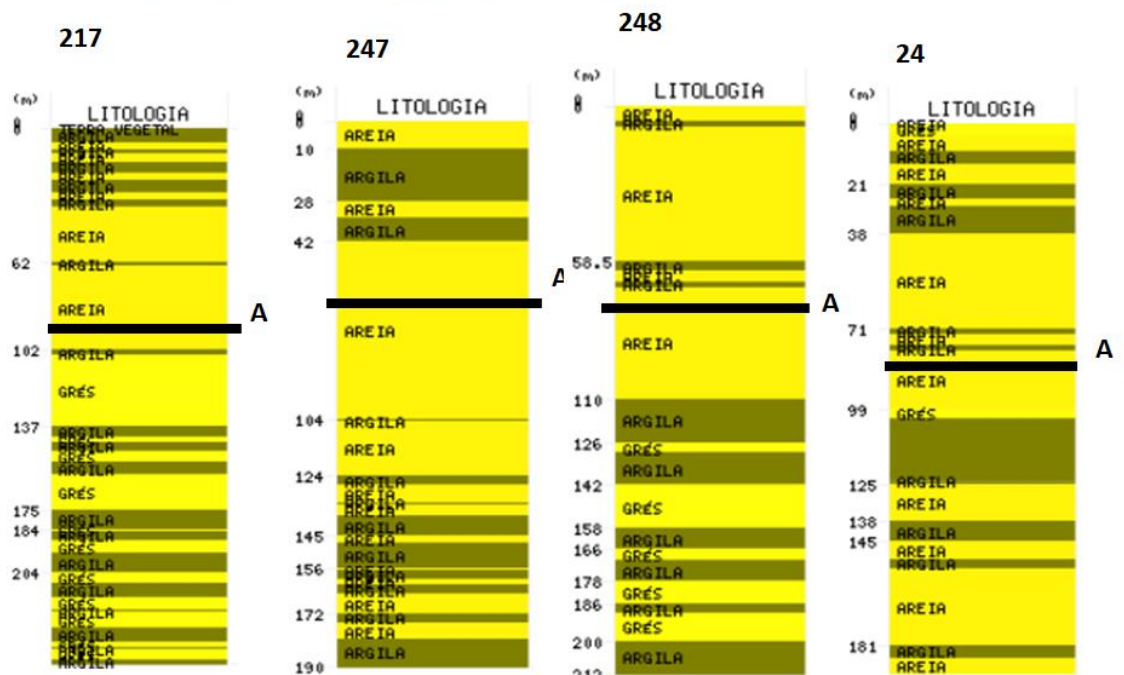
ANEXOS

LOGS DE SONDAGENS

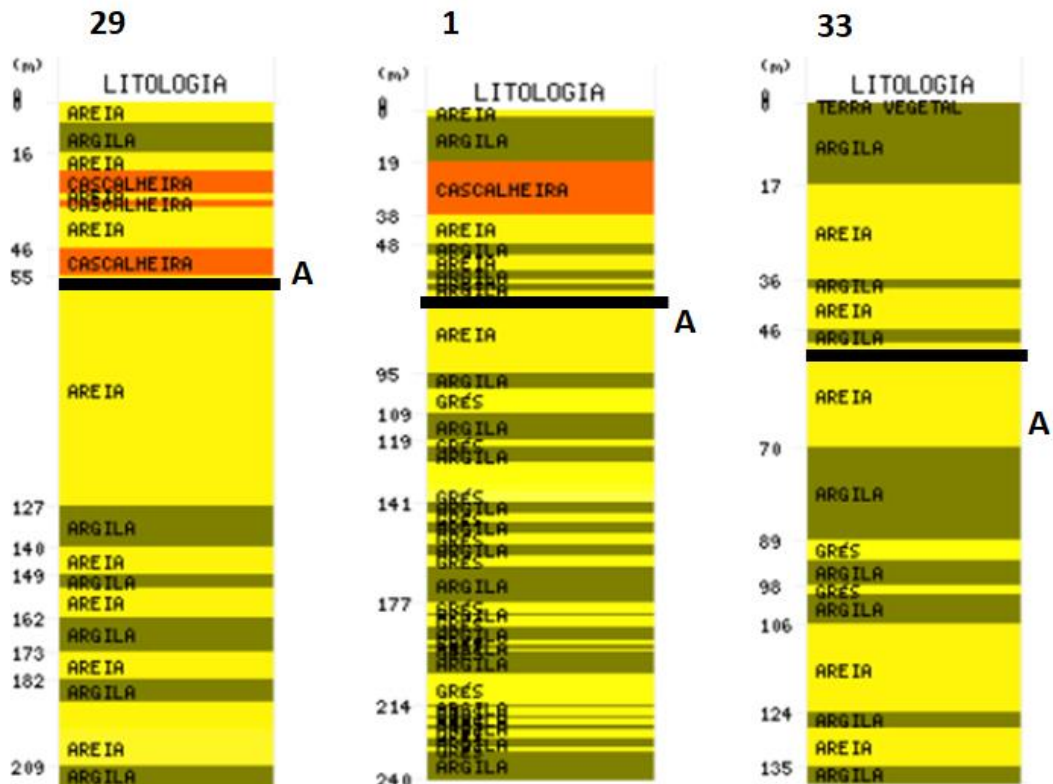
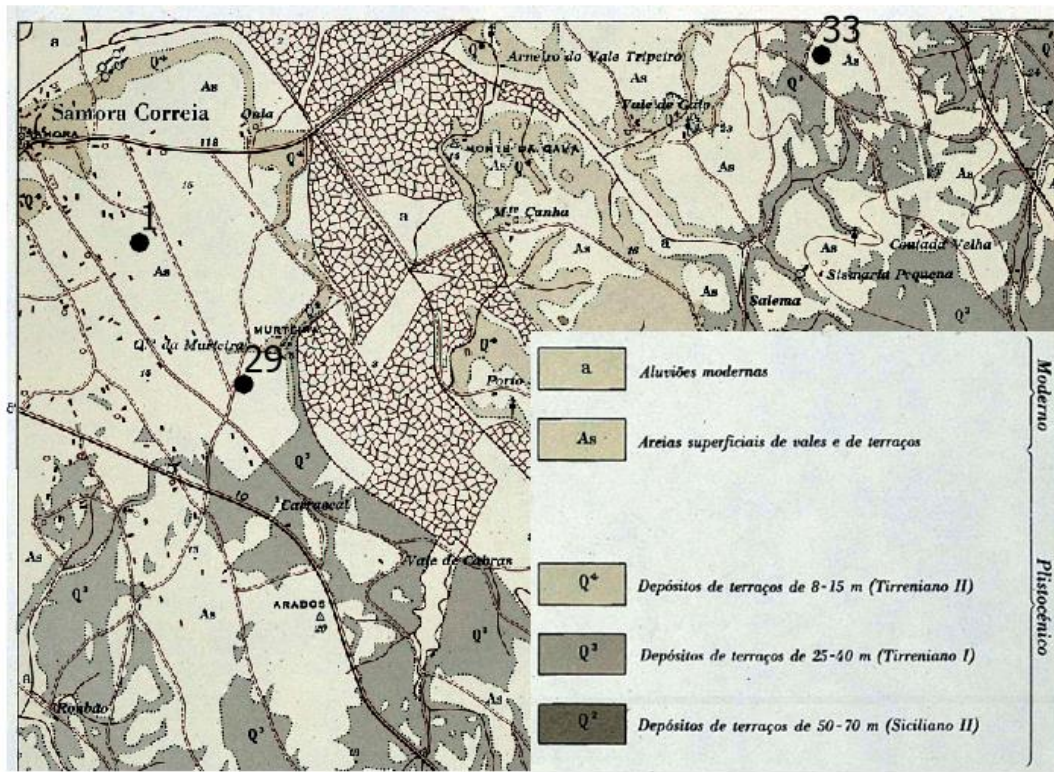
A.1. REGIÃO DE LOURES (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 34-B)



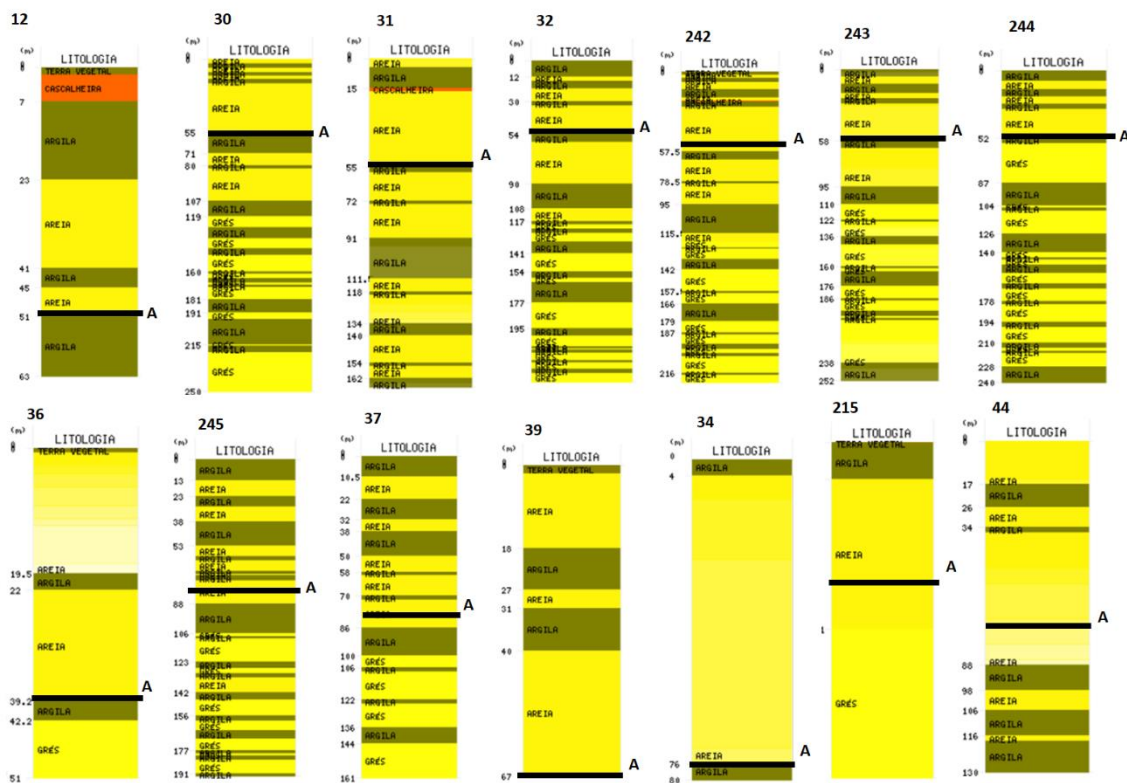
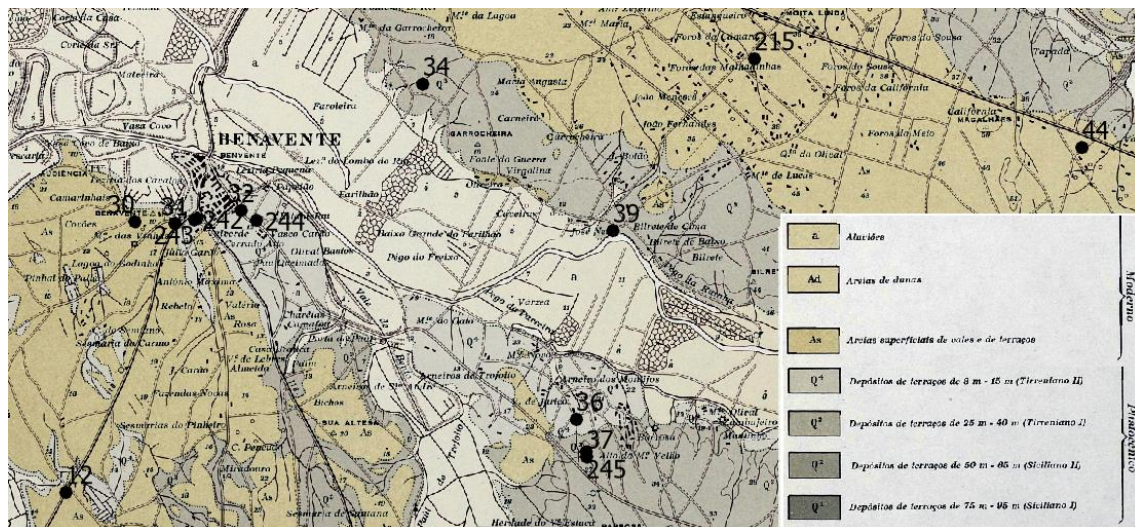
A - base do aquífero aluvionar



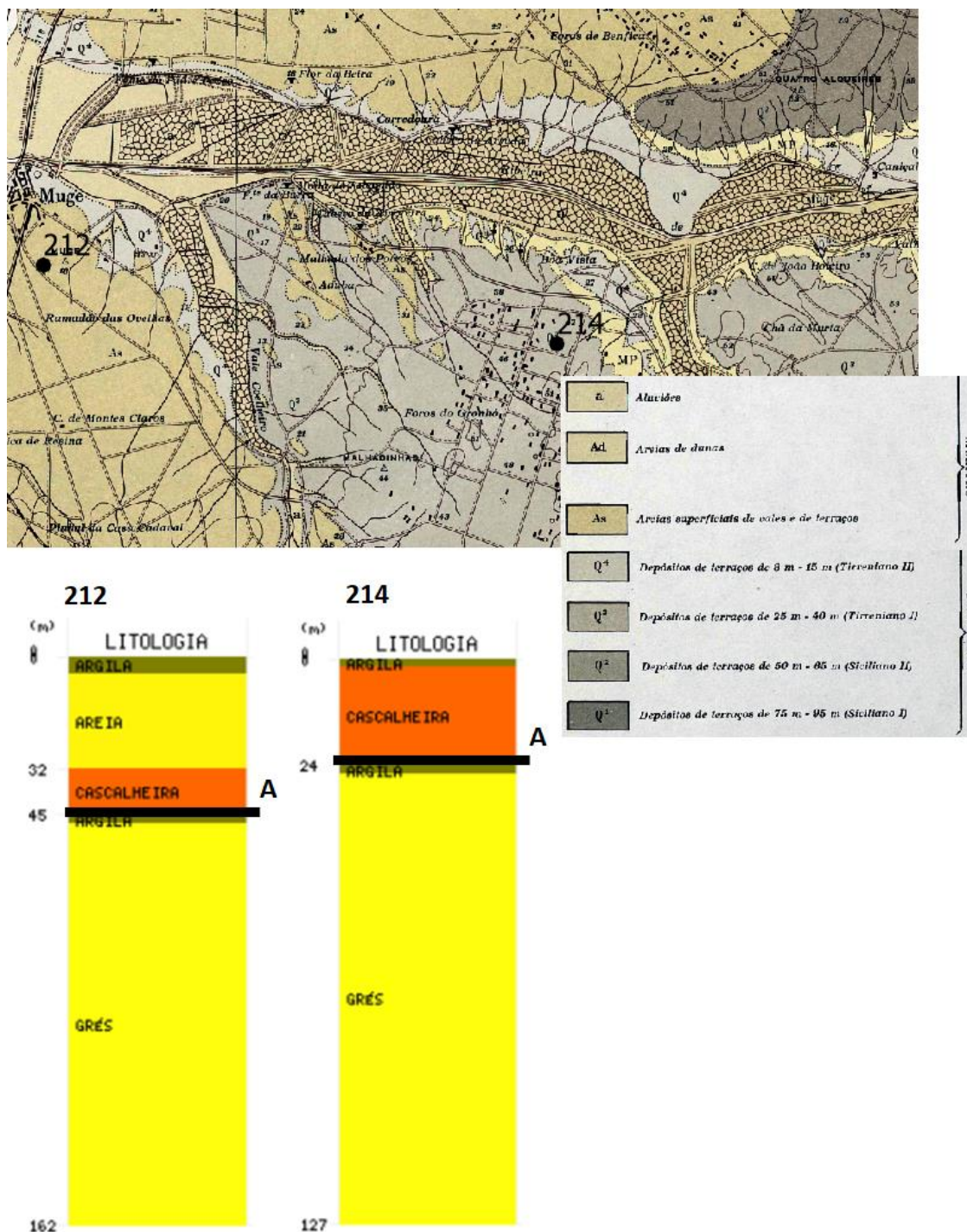
A.2. REGIÃO DE SANTO ESTEVÃO (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 35-A)



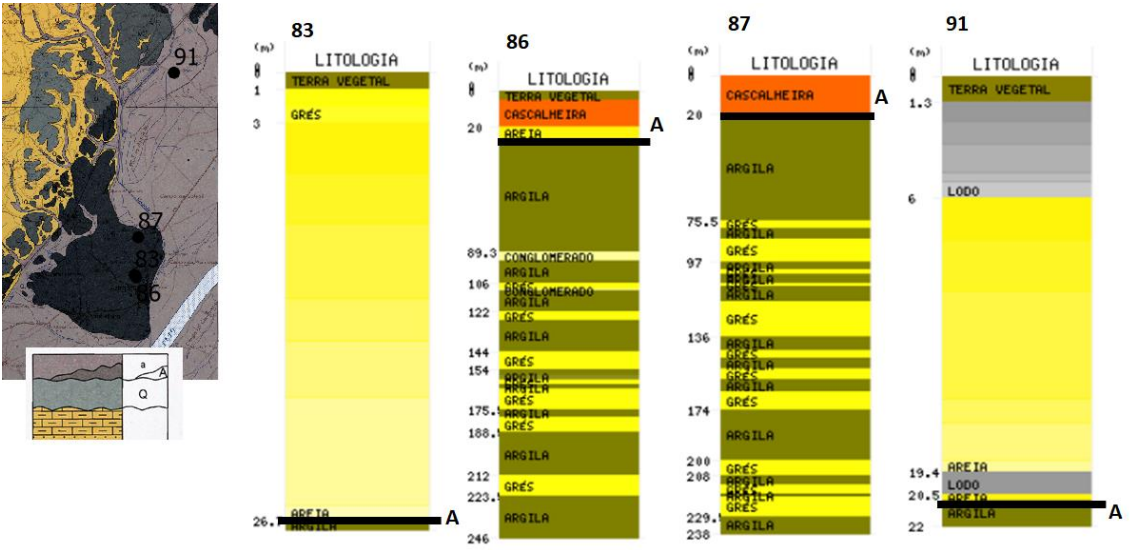
A.3. REGIÃO DE CORUCHE (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-C)



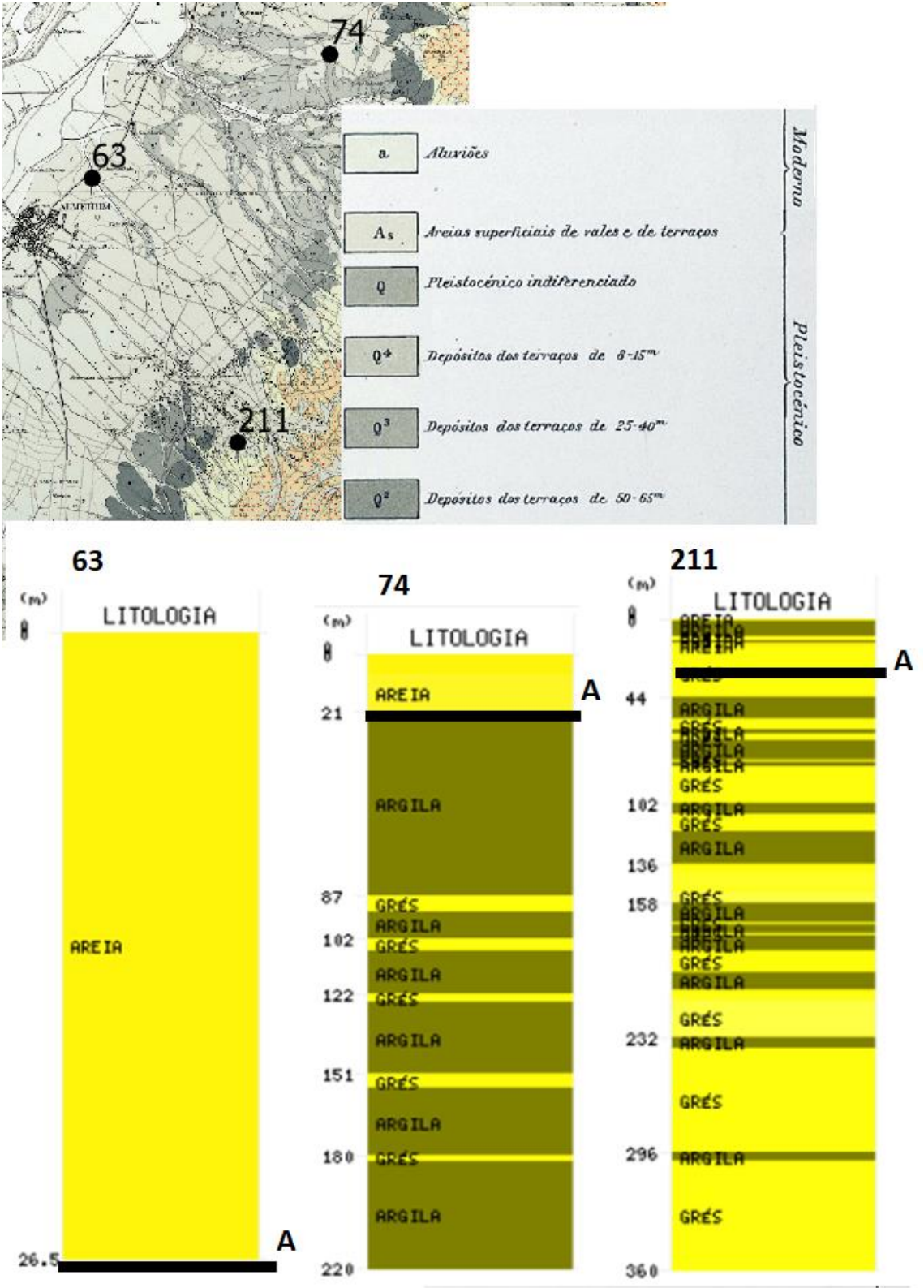
A.4. REGIÃO DE CORUCHE (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-C)



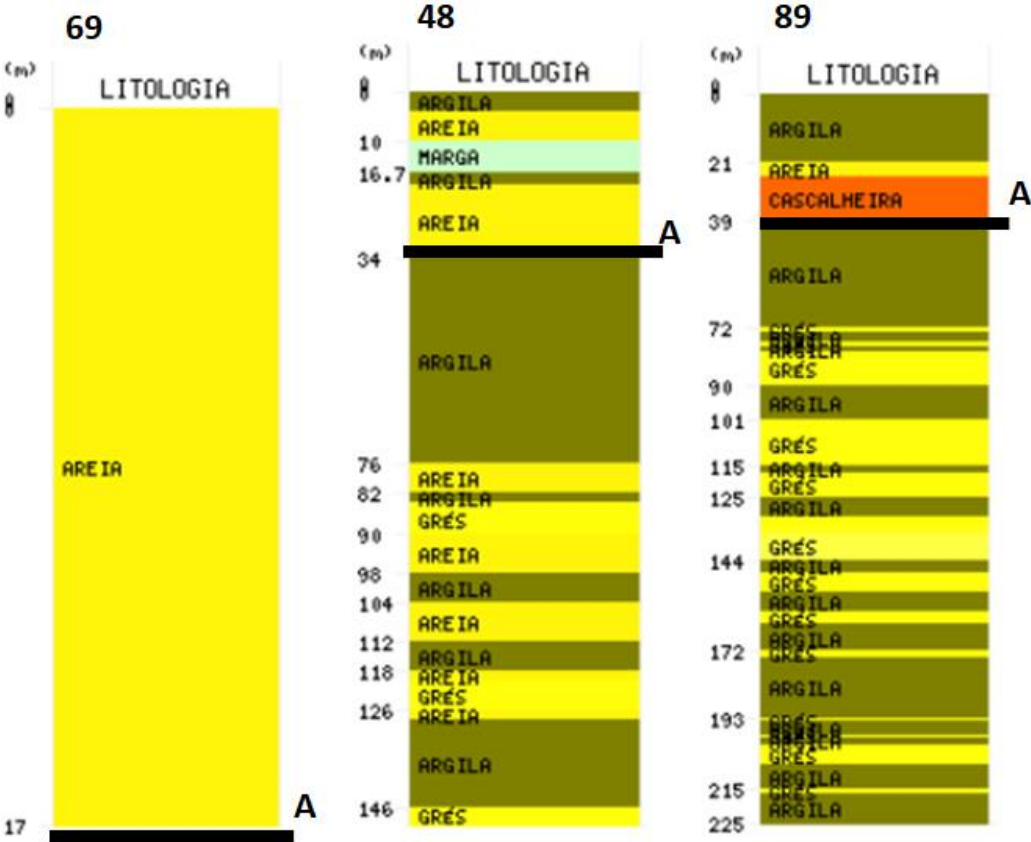
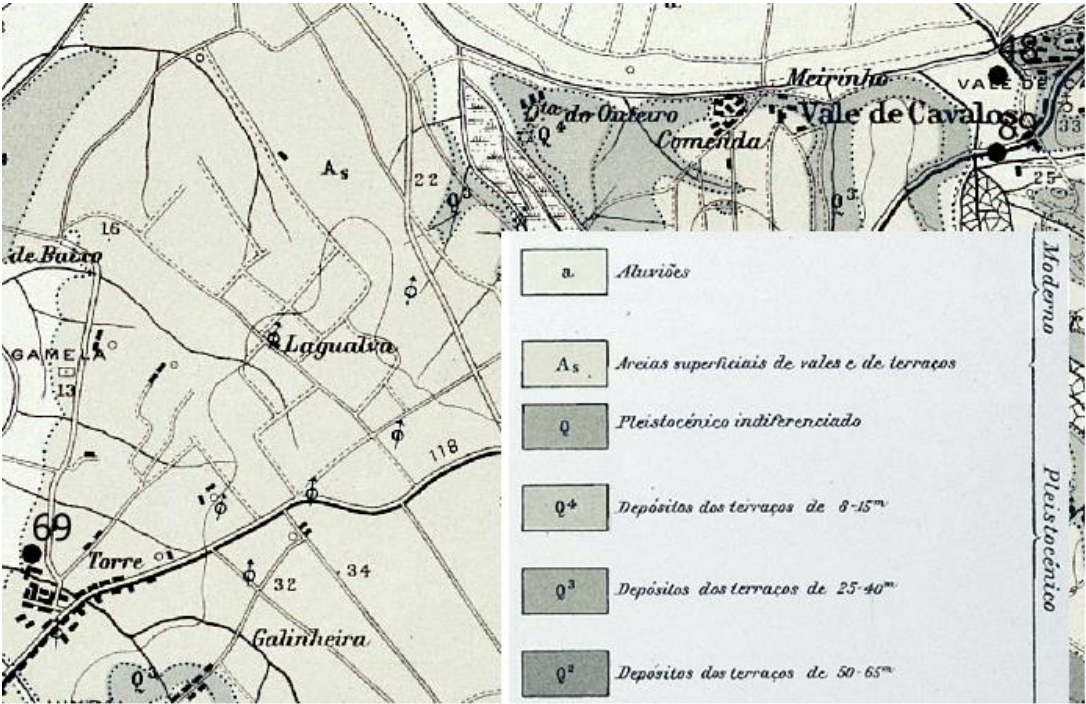
A.5. REGIÃO DE TORRES NOVAS (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 27-C)



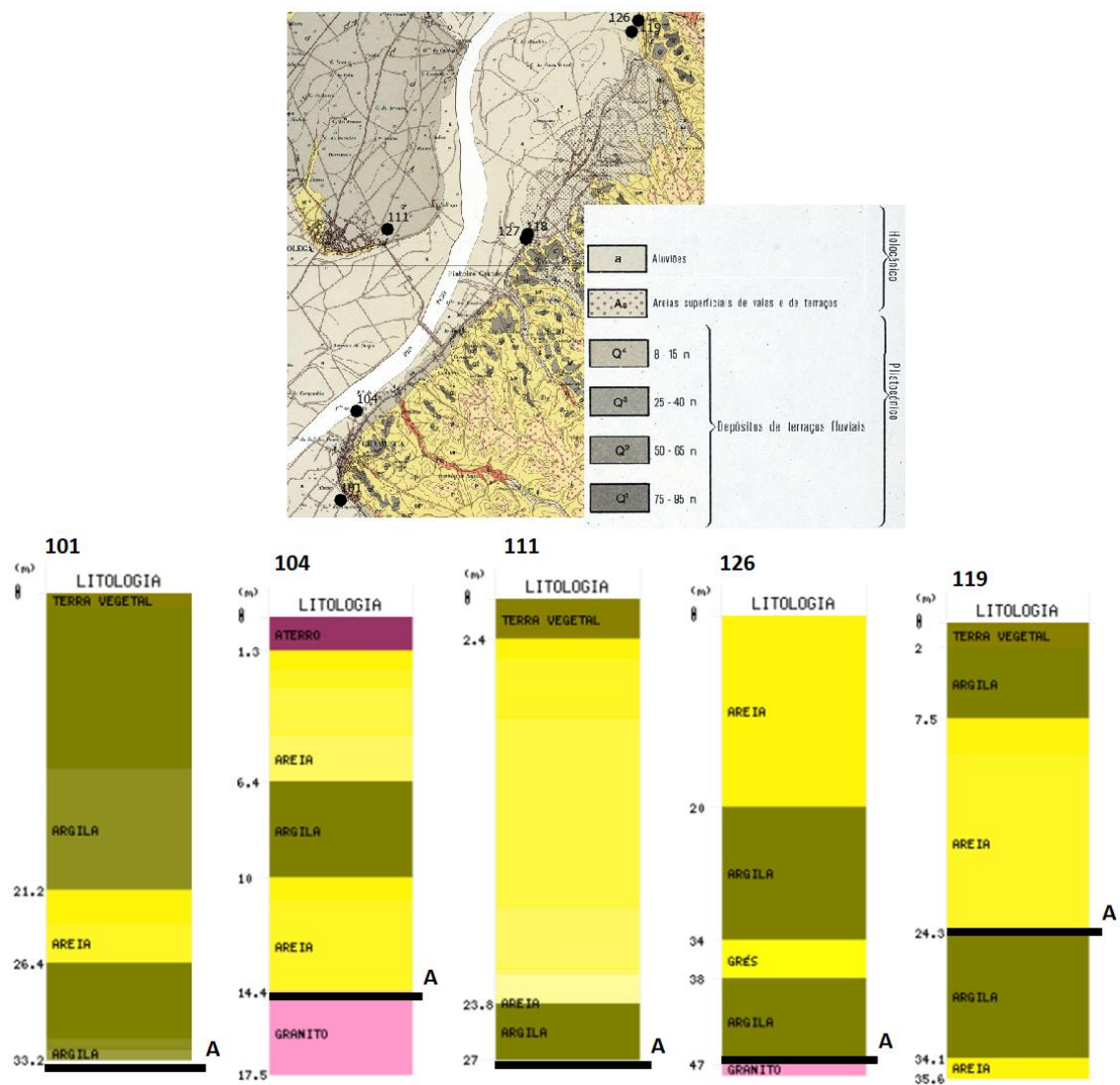
A.6. REGIÃO DE SANTARÉM (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-A)



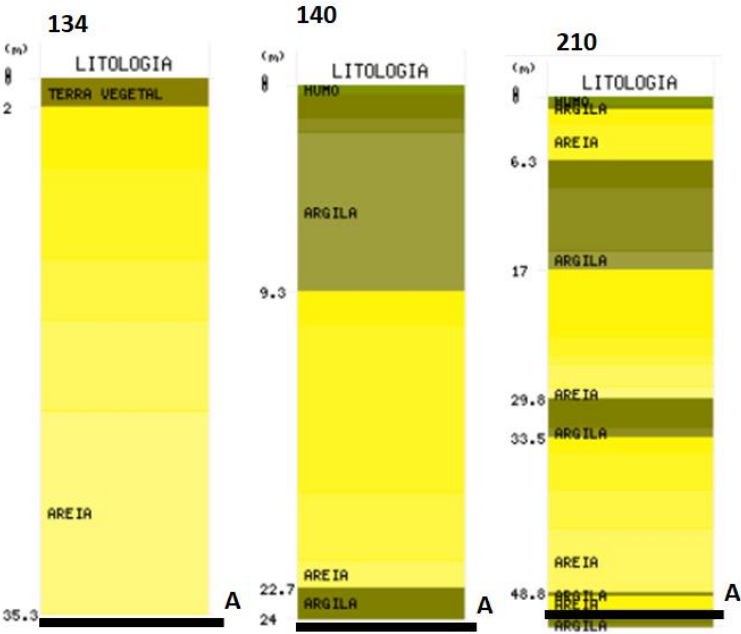
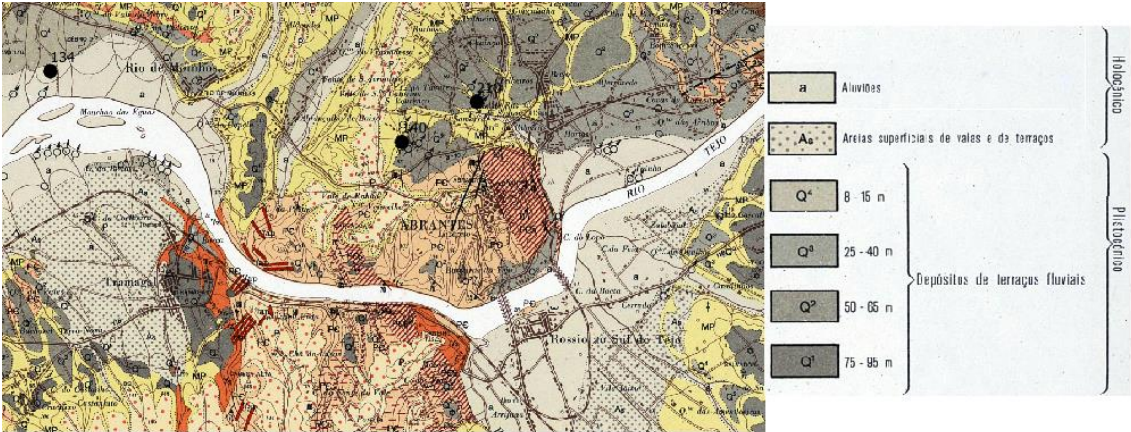
A.7. REGIÃO DE SANTARÉM (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 31-A)



A.8. REGIÃO DE ABRANTES (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 27-D)



A.9. REGIÃO DE ABRANTES (CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, 1:50000, FOLHA 27-D)



MATRIZ DE CORRELAÇÃO

	SO ₄ (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg/Ca	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	Cond Elétrica (µS/cm)	pH Amostra	Temp Amostra (°C)	Mg/Cl	NaCl (ppm)	NO ₃ - (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Mg (mg/L)
SO ₄ (mg/L)	1,00																
Na (mg/L)	0,13	1,00															
Ca (mg/L)	0,70	0,15	1,00														
Mg/Ca	-0,13	0,29	-0,46	1,00													
Cl/HCO ₃	0,18	0,01	0,04	-0,04	1,00												
SO ₄ /Cl	0,56	-0,26	0,23	-0,17	-0,23	1,00											
Cond Elétrica (µS/cm)	0,64	-0,10	0,73	-0,20	-0,06	0,27	1,00										
pH Amostra	0,30	0,45	0,30	0,00	0,13	0,09	0,35	1,00									
Temp Amostra (°C)	-0,16	-0,20	-0,04	-0,13	-0,07	0,02	-0,03	0,01	1,00								
Mg/Cl	0,29	-0,24	0,32	-0,13	-0,29	0,67	0,25	0,16	0,05	1,00							
NaCl (ppm)	0,25	0,21	0,15	-0,05	0,96	-0,20	0,04	0,27	-0,11	-0,25	1,00						
NO ₃ - (mg/L)	0,12	-0,11	0,32	-0,06	-0,04	-0,10	0,30	-0,22	0,01	0,04	-0,07	1,00					
Fe (mg/L)	0,05	-0,09	0,11	-0,04	-0,05	0,12	0,13	0,06	0,10	0,27	-0,05	-0,13	1,00				
Mn (mg/L)	0,32	-0,03	0,22	0,03	-0,12	0,35	0,34	0,14	-0,02	0,31	-0,06	-0,08	0,61	1,00			
Cl (mg/L)	0,24	0,09	0,13	-0,08	0,97	-0,17	0,03	0,22	-0,09	-0,22	0,99	-0,06	-0,04	-0,06	1,00		
HCO ₃ (mg/L)	0,56	0,45	0,79	-0,28	0,01	0,19	0,60	0,46	-0,17	0,30	0,20	0,04	0,20	0,38	0,15	1,00	
Mg (mg/L)	0,63	0,55	0,72	0,11	0,01	0,01	0,56	0,38	-0,15	0,21	0,15	0,22	0,10	0,26	0,09	0,67	1,00